

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal

Alline Zagnoli Villela Motta

**INFLUÊNCIA DOS FATORES AMBIENTAIS NA ALTURA DE ÁRVORES
EMERGENTES NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Diamantina

2020

Alline Zagnoli Villela Motta

**INFLUÊNCIA DOS FATORES AMBIENTAIS NA ALTURA DE ÁRVORES
EMERGENTES NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Eric Bastos Görgens

Diamantina

2020

Elaborado com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M921i

Motta, Alline Zagnoli Villela

Influência dos fatores ambientais na altura de árvores emergentes na Amazônia Brasileira / Alline Zagnoli Villela Motta, 2020.
110 p.: il.

Orientador: Eric Bastos Gorgens

Dissertação (Mestrado– Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2020.

I. Altura emergente. 2. Floresta tropical. 3. Fatores ambientais. 4. LIDAR. 5. Laser. 6. Amazônia. 7. Altura da árvore. I. Gorgens, Eric Bastos. II. Título. III. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

CDD 634.9

Ficha Catalográfica – Sistema de Bibliotecas/UFVJM
Bibliotecária: Viviane Pedrosa – CRB6/2641



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

ALLINE ZAGNOLI VILLELA MOTTA

**INFLUÊNCIA DOS FATORES AMBIENTAIS NA ALTURA DE ÁRVORES
EMERGENTES NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em **Ciência Florestal** da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, **nível de Mestrado**, como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência Florestal**.

Orientador: Prof. **Eric Bastos Gorgens**

Data de aprovação 03/08/2020.

Dra. Graciela Tejada Pinell - (INPE)

Dr. Adriano Lima - (INPA)

Dr. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto - (INPE)



Documento assinado eletronicamente por **Graciela Tejada Pinell, Usuário Externo**, em 03/08/2020, às 11:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriano José Nogueira Lima, Usuário Externo**, em 03/08/2020, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jean Pierre H B Ometto, Usuário Externo**, em 03/08/2020, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eric Bastos Gorgens, Servidor**, em 06/11/2020, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufvjm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0136269** e o código CRC **3A6B58F8**.

AGRADECIMENTOS

Mais difícil do que escrever esta dissertação, é resumir em poucas palavras a gratidão que sinto por todas as pessoas maravilhosas que cruzaram meu caminho. Primeiramente, agradeço a minha família que sempre foi meu tudo, porto seguro para compartilhar tristezas e alegrias. À minha **mãe** e meu **pai**, que se sacrificaram de formas que talvez eu nunca entenda, para que eu pudesse alcançar meus objetivos acadêmicos e pessoais, com todo o amor e abnegação que somente os pais são capazes de oferecer. Sinto-me orgulhosa e privilegiada por ter pais tão especiais. A minha **irmã**, pela amizade e companheirismo, independente da distância física, e por me dar a sobrinha/afilhada mais linda do mundo. Aos meus tios **Eustáquio e Tânia** e minhas primas **Paula, Márcia e Jaqueline** por todo o apoio e carinho, vocês são a família que eu escolhi nessa vida.

Agradeço ao **Prof. Eric Gorgens** por todo o ensinamento, confiança, amizade e encorajamento ao longo desses dois anos. Resumi-lo a meu orientador é pouco, mais do que orientar, você sempre me motivou a enfrentar os desafios e a crescer com eles, por várias vezes foi conselheiro e sempre acolhedor. Por todas as oportunidades incríveis que me foram oferecidas, meu muito obrigada.

Agradeço a todos que me receberam de braços abertos no **INPE**, especialmente aos integrantes do **CCST**, pelos sete meses de muito aprendizado e pela convivência incrível, dentro e fora da instituição. Não poderia deixar de agradecer a **Bete** e ao **Mauro**, que pela segunda vez, me receberam e cuidaram de mim como se eu fosse da família. Minha estadia em São José definitivamente não seria a mesma sem o privilégio de estar com vocês.

Agradeço a **Luiza**, minha colega de laboratório que rapidamente virou meu ponto de referência sobre como ser uma amiga dedicada e leal. Você esteve sempre comigo nos melhores e piores momentos, e conseguiu me fazer rir em todos eles. Obrigada por aturar todos os meus surtos de pós-graduanda e ainda assim conseguir manter a calma e a plenitude, você é uma pessoa incrível! Agradeço ao **Jhon**, pelas leituras, revisões, questionamentos e discussões sempre tão produtivas, que além de ser um parceiro fundamental para o desenvolvimento deste trabalho se tornou um amigo muito querido. Agradeço a **Eliza** pelos oito anos de amizade sincera e simples, não importante onde ou com quem estivéssemos, a solidez da nossa amizade sempre foi uma constante importante na minha vida.

Agradeço ao Projeto Estimativa de Biomassa na Amazônia – **EBA**, pelos dados ALS utilizados neste trabalho. A todas as pessoas envolvidas no projeto, direta ou

indiretamente, que se dispuseram a esclarecer dúvidas e discutir pontos importantes para a minha dissertação, obrigada.

Agradeço à **UFVJM** pela estrutura necessária para conclusão do mestrado e a todos os professores, funcionários e alunos do Departamento de Engenharia Florestal da UFVJM. Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela bolsa concedida, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Por fim, agradeço aos membros da banca que tão gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta dissertação.

RESUMO

A floresta amazônica desempenha importante papel no que tange à serviços ecossistêmicos essenciais para o bem-estar humano, como o armazenamento de carbono e a regulação climática e do ciclo da água, constituindo-se como um grande reservatório de carbono estocado na biomassa, ameaças à floresta como o desmatamento e a degradação acarretam em mudanças na dinâmica climática do planeta e o consequente aumento de temperatura terrestre. Diversos países têm se empenhado em combater o aquecimento global e isso inclui ações de políticas públicas que visam reduzir o desmatamento. Para tal, é necessário adquirir dados confiáveis sobre a quantificação do estoque de carbono associado à biomassa florestal acima do solo (AGB). Devido à grande extensão da floresta amazônica brasileira, a quantificação da biomassa para se estimar o carbono enfrenta uma série de desafios, acarretando em estimativas de estoque que diferem-se entre si. Um dos obstáculos para determinar a AGB vem da dificuldade de medir a altura das árvores, principalmente se tratando de florestas tropicais. A tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportada configura-se como uma alternativa para facilitar a coleta de informações da floresta em larga escala, possibilitando que a altura precisa da vegetação seja obtida. Levando-se em consideração que o aumento em altura da planta é influenciado diretamente pelo seu meio ambiente, o objetivo do presente estudo foi analisar e descrever a influência de alguns fatores ambientais na variação da altura máxima das árvores na Amazônia Brasileira obtidas a partir de dados LiDAR. As nuvens de pontos LiDAR utilizadas referem-se a 753 transectos espalhados aleatoriamente por toda a Amazônia brasileira. Já as camadas dos fatores ambientais solo, topografia, clima e vegetação, foram obtidas de fontes governamentais confiáveis. Foi produzido um mapa com a distribuição das alturas máximas na Amazônia brasileira, além de feitas análises de variabilidade das alturas dentro e entre os mapas de fatores ambientais. Árvores com mais de 50 metros em altura estão distribuídas praticamente em toda a região, mas árvores acima de 80 metros foram observadas apenas ao Leste da Amazônia brasileira. As alturas máximas estavam presentes, predominantemente, em Argissolo e/ou Latossolo, áreas caracterizadas pelo excesso de umidade durante o ano todo, solos formados por escudos cristalinos e em tipologia florestal ombrófila densa de submontana. A altura apresentou menor variância, ou seja, mostrou-se mais homogênea, quando estratificada pelo relevo, e maior variância, mais heterogênea, quando estratificada pelo solo.

Palavras chave: Altura emergente. Floresta tropical. Fatores ambientais. LiDAR. Laser. Amazônia. Altura da árvore.

ABSTRACT

The Amazon rainforest plays an important role concerning essential ecosystem services for human well-being, such as carbon storage and climate and water cycle regulation, making it a large carbon reservoir stored in biomass, threats to forests such as deforestation and degradation lead to changes in the planet's climatic dynamics and the consequent increase in global temperature. Several countries have been working to combat global warming and this includes public policy actions aimed at reducing deforestation. For that, it is necessary to acquire reliable data on the quantification of the carbon stock associated with the above-ground forest biomass (AGB). Due to the great extent of the Brazilian Amazon rainforest, the quantification of biomass to estimate the carbon faces a series of challenges, resulting in stock estimates that differ from each other. One of the obstacles to determining AGB comes from the difficulty of measuring the height of trees, especially in the case of tropical forests. The airborne LiDAR (Light Detection And Ranging) technology is configured as an alternative to facilitate the collection of forest information on a large scale, enabling the precise height of the vegetation to be obtained. Taking into account that the increase in plant height is directly influenced by its environment, the objective of the present study was to analyze and describe the influence of some environmental factors in the variation of the maximum height of trees in the Brazilian Amazon Forest obtained from the LiDAR data. The LiDAR point clouds used, refer to 753 transects spread randomly throughout the Brazilian Amazon. The layers of the environmental factors: soil, topography, climate, and vegetation were obtained from reliable government sources. A map was produced with the distribution of maximum heights in the Brazilian Amazon, in addition to the analysis of the variability of the heights within and between maps of environmental factors. Trees over 50 meters in height are distributed practically throughout the region, but trees over 80 meters were observed only in the East of the Brazilian Amazon. The maximum heights were present, predominantly, in Argisol and/or Latosol, areas characterized by excessive humidity throughout the year, soils formed by crystalline shields and in dense sub-mountainous rainforest typology. The height presented less variance, that is, it was more homogeneous when stratified by the relief, and greater variance, more heterogeneous, when stratified by the soil.

Keywords: Emerging heights. Tropical forest. Environmental factors. LiDAR. Laser. Amazônia. Tree Heigh.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Princípios e componentes de um sistema ALS	18
Figura 2 – Fluxograma apresentando o desenvolvimento do trabalho	22
Figura 3 – Área de estudo	23
Figura 4 – Espacialização das maiores árvores de cada transecto por classe de altura ..	33
Figura 5 – Mapa de Solos da Amazônia Legal e % de árvores por classe	35
Figura 6 – Distribuição das árvores emergentes acima de 70m de altura	36
Figura 7 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de solo	37
Figura 8 – Mapa de Potencial de Agressividade Climático na Amazônia Legal e % de árvores por classe	38
Figura 9 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de clima.....	40
Figura 10 – Distribuição das árvores emergentes nas classes de potencial de agressividade climática.....	41
Figura 11 – Mapa de Unidades de Relevo da Amazônia Legal e % de árvores emergentes das seis classes com maior %.....	42
Figura 12 – Distribuição das árvores emergentes nos Domínios Morfoestruturais	43
Figura 13 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de unidade de relevo	44
Figura 14 – Mapa de Vegetação da Amazônia Legal e % de árvores emergentes das seis classes com maior %	46
Figura 15 – Distribuição das árvores emergentes acima de 70m de altura.....	47
Figura 16 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de vegetação.....	48
Figura 17 – Mapa de Solos do Brasil (IBGE, 2001).....	65
Figura 18 – Mapa de Solos do Brasil (MMA, 2006)	66
Figura 19 – Mapa de estoques de carbono no solo (BERNOUX <i>et al.</i>, 2002).....	67
Figura 20 – Mapa de Solos (QUESADA <i>et al.</i>, 2011)	69
Figura 21 – Mapa dos Compartimentos de Relevo do Brasil (MMA, 2002).....	70
Figura 22 – Mapa de Unidades de Relevo do Brasil (IBGE, 2006).....	71
Figura 23 – Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 1992).....	72
Figura 24 – Mapa de Vegetação da Amazônia Legal (MMA, 2002).....	73

Figura 25 – Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2004)	74
Figura 26 – Mapa de Clima do Brasil (IBGE, 2002).....	75
Figura 27 – Mapa de Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal (IBGE, 2014)	76
Figura 28 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de solo	78
Figura 29 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de solo	81
Figura 30 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de solo	84
Figura 31 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de solo	87
Figura 32 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de relevo	90
Figura 33 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de relevo	93
Figura 34 - Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de vegetação	96
Figura 35 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de vegetação	99
Figura 36 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de vegetação	102
Figura 37 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de clima	105
Figura 38 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de clima	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Mapas de fatores ambientais usados nas análises.....	25
Tabela 2 – Classe do potencial de agressividade climática	28
Tabela 3 – Comparação entre camadas de solo	34
Tabela 4 – Comparação entre camadas de clima.....	38
Tabela 5 – Comparação entre camadas de relevo.....	41
Tabela 6 – Comparação entre camadas de vegetação.....	45
Tabela 7 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Solos do Brasil (IBGE, 2001).....	77
Tabela 8 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Solos do Brasil (MMA, 2002).....	80
Tabela 9 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de estoque de carbono no solo (BERNOUX <i>et al.</i> , 2002).....	83
Tabela 10 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de solos (QUESADA <i>et al.</i> , 2011).....	86
Tabela 11 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa dos Compartimentos de Relevo do Brasil (IBGE, 2002)	89
Tabela 12 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Unidades de Relevo do Brasil (IBGE, 2006).....	92
Tabela 13 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 1922)	95
Tabela 14 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2002)	98
Tabela 15 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2004)	101
Tabela 16 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Clima do Brasil (IBGE, 2002).....	104
Tabela 17 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Potencial da Agressividade Climática na Amazônia Legal (IBGE, 2014)	107

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Monitoramento de campo	17
2.2 Sensoriamento remoto por LiDAR	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 Área de estudo.....	22
3.2 Aquisição e processamento dos dados LiDAR.....	23
3.3 Variáveis ambientais	24
3.4 Análise estatística.....	30
4 RESULTADOS	33
4.1 Mapa de alturas emergentes	33
4.2 Variáveis ambientais	34
5 DISCUSSÃO	51
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
APÊNDICE A – MAPAS E LEGENDAS DETALHADAS.....	65
APÊNDICE B - GRÁFICOS E TABELAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia é a maior floresta tropical contínua do mundo, cobre aproximadamente 5,5 milhões de quilômetros quadrados, e representa cerca de um terço das florestas tropicais na Terra (MMA, 2020). A floresta amazônica desempenha um papel fundamental em relação aos serviços ecossistêmicos que presta, tais como o armazenamento de carbono, a regulação climática e do ciclo da água, tratando-se, portanto, de uma região de grande interesse global (CLEMENT; HIGUCHI, 2006; NOBRE *et al.*, 2007).

As florestas são importantes reservatórios de carbono nos ecossistemas terrestres. O carbono estocado na biomassa viva e nos solos equivalem a três vezes o dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera (FALKOWSKI *et al.*, 2000). O CO₂, juntamente com o metano e o óxido nitroso, são os principais gases de efeito estufa (GEE). O desmatamento e a degradação das florestas contribuem para o aumento da concentração dos GEE na atmosfera. As emissões de CO₂ por mudanças de uso e cobertura da terra representam a maior parte de emissões de GEE no Brasil. Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) do Observatório do Clima, do total de 1,939 bilhão de toneladas brutas de GEE emitidas em 2018, medidas em gás carbônico equivalente (CO₂ e), 44% (845 Mt CO₂ e) vieram das mudanças de uso da terra, sobretudo do desmatamento na Amazônia e no Cerrado (SEEG, 2019).

Diversos países têm se empenhado em combater o aquecimento global e isto inclui ações que visam reduzir o desmatamento, principalmente em nações por onde se estendem florestas tropicais, como é o caso do Brasil. O mecanismo denominado REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal), proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU), necessita de dados de qualidade e confiáveis sobre a quantificação do estoque de carbono associado à biomassa florestal, e do desflorestamento em si.

A quantificação da biomassa para se estimar o estoque de carbono na floresta Amazônica brasileira enfrenta uma série de dificuldades devido à grande extensão da floresta, acarretando em uma grande incerteza nos estoques de carbono da biomassa acima do solo (AGB) armazenados na região (OMETTO *et al.*, 2014). A dificuldade da determinação da biomassa em campo, as diferentes metodologias aplicadas e fontes de dados de sensoriamento remoto também são fatores que pesam para que as estimativas variem entre as pesquisas e os mapas divulgados.

Uma das etapas para determinar a biomassa em campo é a medição da altura das árvores. No entanto, o dossel fechado, o espaçamento irregular e as condições climáticas

extremas encontradas nestes ambientes fazem com que seja inviável a obtenção de todas as alturas das parcelas de campo. Para contornar este problema, durante os inventários florestais costuma-se medir o diâmetro de todas as árvores da parcela e a altura de alguns indivíduos. Utilizando os pares de diâmetros e alturas mensuradas, ajusta-se equações matemáticas para estimar a altura das árvores não medidas (SOARES, NETO e SOUZA, 2011).

O desenvolvimento em altura da planta é influenciado diretamente por fatores climáticos, edáficos, fisiográficos e bióticos, atuando com maior ou menor intensidade sobre o processo de crescimento (CAMPOS, 1970). Portanto, como a altura das árvores se comportam ao longo da floresta Amazônica é de grande importância no entendimento das relações ecológicas gerais e dos padrões biogeográficos.

Vários grupos de pesquisa vêm trabalhando para produzir mapas de estimativa de biomassa e, conseqüentemente, da estimativa da quantidade de carbono estocado na maior floresta tropical do planeta. O projeto “Melhoria dos métodos de estimativa de biomassa e de modelos de estimativa de emissões por mudança de uso da terra” (EBA) foi a primeira iniciativa do Brasil para coletar um grande volume de dados LiDAR espacialmente aleatório de todo o bioma Amazônia. O objetivo do projeto foi gerar um novo mapa de biomassa florestal utilizando a tecnologia LiDAR aerotransportada, ou ALS (do inglês, *Airborne Laser Scanning*). O LiDAR é um sensor laser ativo que possui elevada penetrabilidade e alta resolução espacial, possibilitando que a superfície do terreno e seus objetos sejam modelados tridimensionalmente (GORGENS *et al.*, 2016; COOMES, *et al.* 2006).

As informações da altura da vegetação, obtidas com precisão no projeto EBA, foram utilizadas no presente trabalho, que tem como objetivo analisar a associação da altura com fatores ambientais na Amazônia Brasileira.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Monitoramento de campo

O crescimento das plantas consiste em todo aumento em biomassa, que seja irreversível. Ocorre com o processo de alongamento e divisão celular dos tecidos meristemáticos primário, responsável pelo crescimento em altura da planta, e secundário, responsável pelo crescimento em diâmetro (cambial), em um determinado período de tempo (HIGUCHI; HIGUCHI, 2012, p. 75). O crescimento de uma árvore depende de características fisiológicas inerentes a cada espécie e idade, ou ainda de limitações físicas. O aumento do estresse foliar hídrico, devido à resistência à gravidade e ao comprimento do caminho do xilema, pode limitar o crescimento em altura. Estima-se que a altura máxima que uma árvore pode atingir está entre 122 e 130 metros (KOCH *et al.* 2004). Além disso, o crescimento também está relacionado com a interação da planta, de forma isolada ou em conjunto, com fatores do ambiente como os climáticos, edáficos, topográficos, competição com outras plantas, estações do ano e condições microclimáticas (SILVA *et al.*, 2003; MALHI *et al.*, 2006; QUESADA *et al.*, 2011).

O estudo do crescimento das árvores possibilita conhecer o potencial de produção de um determinado sítio ou local. Para se obter uma boa produção é fundamental conhecer as características inerentes ao sítio, uma vez que conhecer as variações ambientais de uma floresta é de grande importância para as atividades florestais. A partir das informações obtidas por meio de parcelas de campo é possível avaliar e monitorar os recursos florestais de uma área.

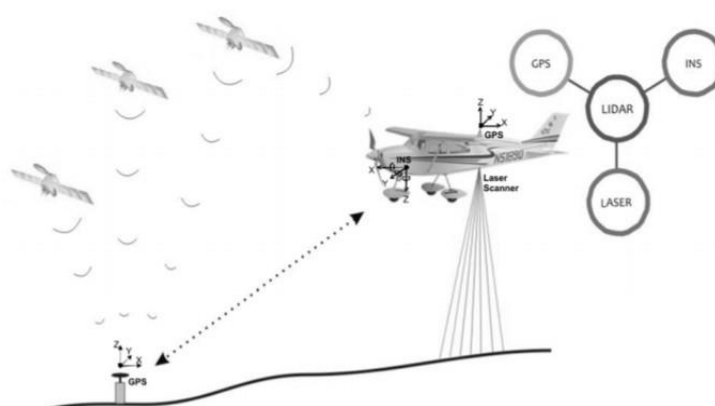
A floresta Amazônica Brasileira possui elevada heterogeneidade ambiental, diversidade de espécies, e recobre uma extensa área. Apesar de fornecerem informações valiosas, as parcelas de campo representam uma fração minúscula da área total da floresta (CHAVE *et al.*, 2020). A rede de parcelas de inventário estabelecidas até o presente momento na Amazônia conta com 5.351 parcelas e cobre apenas 0,0013% de área total (TEJADA *et al.*, 2019). Além disso, existe uma tendência em estabelecer parcelas próximo a estradas ou grandes rios, uma vez que são áreas de fácil acesso (STROPP *et al.*, 2020), implicando em um viés de distribuição espacial (MARVIN *et al.*, 2014).

2.2 Sensoriamento remoto por LiDAR

Diferente dos sensores remotos passivos como fotografias aéreas e imagens de satélite, o LiDAR utiliza energia própria para coletar dados da superfície. Dentre as vantagens da utilização dos sensores ativos (ex: RADAR e LiDAR), podemos citar: independência parcial das condições do tempo (nuvens, chuva, luz e neve); independência da presença de luz solar; e a possibilidade de penetrar no dossel da vegetação (GIONGO *et al.*, 2010). Como desvantagem do sensor LiDAR podemos citar as técnicas de calibração complexas, que se não forem feitas corretamente, podem acarretar em graves erros no sistema de posicionamento dos pontos (HABIB *et al.*, 2008).

O sistema de varredura a laser consiste na emissão de um pulso laser a partir de uma plataforma (terrestre, aérea ou orbital) em direção a um objeto, com uma elevada frequência de repetição. Parte da energia emitida que volta para o sensor é medida por um receptor óptico. Um cronômetro mede o tempo de viagem (ida e volta) do pulso do sensor até o alvo. O sistema LiDAR pode então calcular a distância entre o sensor e o objeto pelo tempo de viagem e velocidade da luz (NÆSSET, 1997; WAGNER *et al.*, 2004). Os sistemas de escaneamento laser aerotransportado (ALS) possuem além do emissor e receptor laser, dois outros componentes: um Sistema Inercial de Navegação (do inglês, *Inertial Measurement Unity* - IMU) e um Sistema Global de Satélite de Navegação (GNSS) (GIONGO *et al.*, 2010) (FIG. 1).

Figura 1 – Princípios e componentes de um sistema ALS



Fonte: Giongo *et al.* (2010).

As aplicações florestais se utilizam da capacidade dos pulsos laser penetrarem por pequenas aberturas no dossel da floresta, permitindo o registro do dossel e seus parâmetros estruturais (POPESCU *et al.*, 2002). Outros parâmetros estruturais da floresta, como a biomassa

da parte aérea, área basal e o diâmetro à altura do peito (DAP), podem ser obtidos por técnicas de modelagem e/ou estimados a partir de métricas extraídas da nuvem LiDAR (DUBAYAH *et al.*, 2000). Levantamentos aerotransportados com LiDAR, aliados a dados de campo, têm sido amplamente utilizados para estimativa de biomassa em florestas tropicais (COOPS *et al.*, 2007; LONGO *et al.*, 2016; ALMEIDA *et al.*, 2019). Os dados obtidos pela varredura a laser também podem ser utilizados para a elaboração de modelos digitais de terreno de extensas áreas florestais com alta precisão, chegando a resoluções sub métricas, mesmo com a presença de um denso dossel (REUTEBUCH *et al.*, 2003).

Levantar informações florestais em campo é um processo oneroso e de difícil logística devido à dificuldade de acesso, às grandes extensões a serem monitoradas e às limitações impostas pelo clima. Assim, o uso de ferramentas de sensoriamento remoto, como o LiDAR aerotransportado, trazem grandes vantagens quando aplicadas à área florestal. A tecnologia LiDAR apresenta um alto potencial no uso florestal uma vez que informações que descrevam a topografia, o tipo de vegetação e a localização dos indivíduos arbóreos, são importantes para o manejo da floresta. As inúmeras possibilidades de processamento da nuvem LiDAR acabam por abrir novas perspectivas de monitoramento dos ecossistemas florestais.

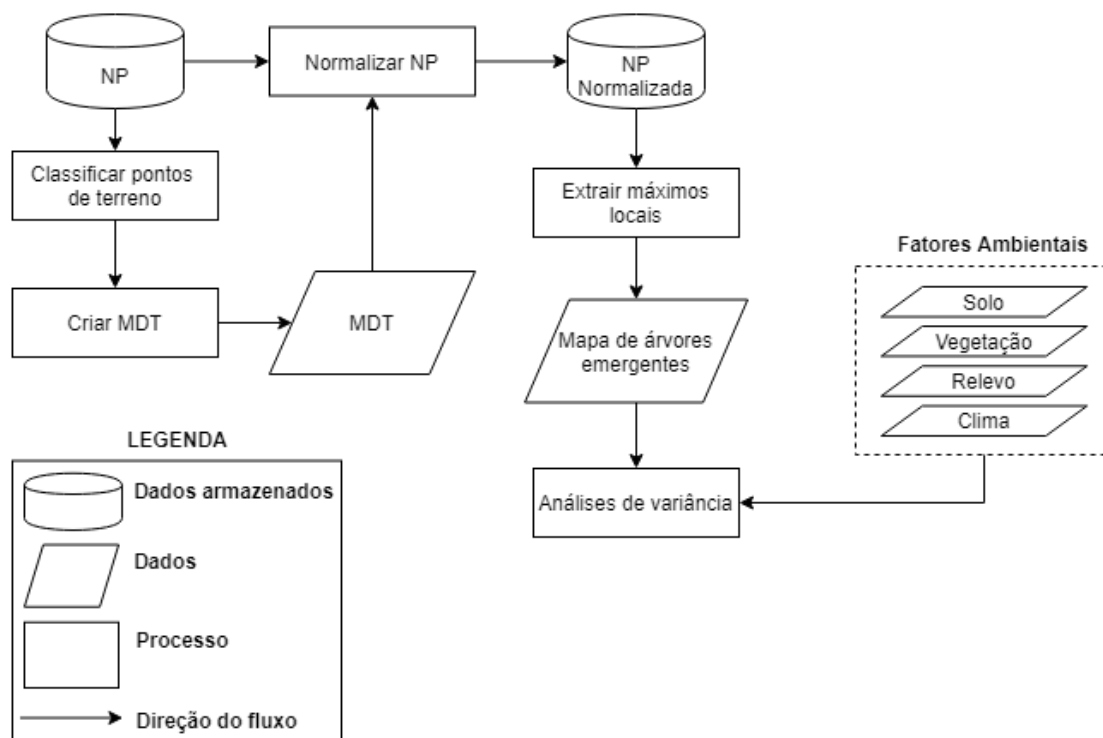
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados LiDAR utilizados no presente estudo foram coletados entre 2016 e 2018. O sobrevoo ocorreu no contexto do Subprojeto 7 (Melhoria dos métodos de estimativa de biomassa e de modelos de estimativa de emissões por mudança de uso da terra) do Projeto Monitoramento Ambiental por Satélites no Bioma Amazônia (MSA), desenvolvido com recursos do Fundo Amazônia.

Para a aquisição dos dados, foram sobrevoados transectos espalhados aleatoriamente por toda a Amazônia brasileira, desde que caíssem sobre área de floresta madura ou secundária. Cada transecto foi processado através da classificação dos pontos de solo e interpolando um modelo digital de terreno (MDT) com resolução espacial de 1 metro. Em seguida, o MDT foi utilizado para normalizar a nuvem LiDAR e calcular as alturas acima do solo de cada retorno. A maior árvore por transecto foi localizada por meio da nuvem de pontos normalizada, usando um filtro local. Posteriormente, a maior árvore de cada transecto foi manualmente inspecionada afim de excluir objetos não-árvores garantir que as maiores alturas obtidas de fato representassem uma árvore.

Realizado este processo, foram localizadas a maior árvore por transecto que foram então associadas às camadas referentes aos fatores ambientais: solo, clima, relevo e vegetação. Por fim, a variabilidade das árvores emergentes dentro e entre os mapas de fatores ambientais foi medida em termos de variação populacional e estratificada. O fluxograma apresentando o desenvolvimento do trabalho pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma apresentando o desenvolvimento do trabalho



Fonte: autora. NP: nuvem de pontos, MDT: modelo digital de terreno

3.1 Área de estudo

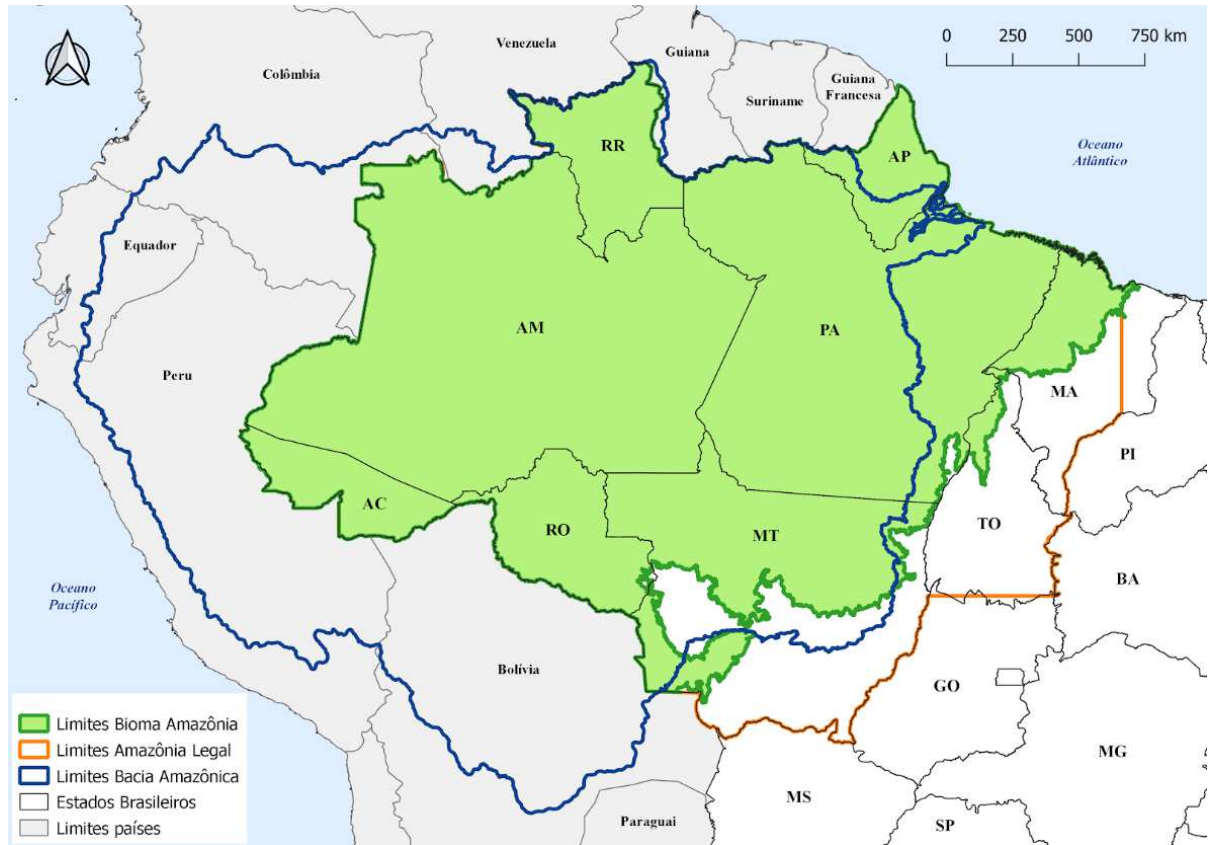
A bacia amazônica ocupa 2/5 da América do Sul e 5% da superfície terrestre, e é compartilhada com outros oito países além do Brasil (FIG. 3). Sua área, de aproximadamente 6,5 milhões de quilômetros quadrados, abriga a maior rede hidrográfica do planeta, que escoar cerca de 1/5 do volume de água doce do mundo. Sessenta por cento da bacia amazônica se encontra em território brasileiro (IBGE, 2004).

Considerando o território brasileiro, o Bioma Amazônia é definido pela unidade de clima, fisionomia florestal e localização geográfica, sendo o maior bioma brasileiro em extensão, ocupando quase metade do território (49,29%). É distribuído em cinco unidades da federação (Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Roraima), grande parte de Rondônia (98,8%), mais da metade de Mato Grosso (54%), além de parte de Maranhão (34%) e Tocantins (9%) (IBGE, 2004).

A área administrativa conhecida como Amazônia Legal representa cerca de 59% do território brasileiro e foi delimitada no artigo 20 da Lei Complementar n. 124, de 03 de Janeiro

de 2007. Abrange os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, parte do Maranhão e cinco municípios de Goiás (IBGE, 2014).

Figura 3 – Área de estudo



Fonte: Os dados de Biomas Brasileiros e Limites da Amazônia Legal do Brasil são do (IBGE, 2004).

3.2 Aquisição e processamento dos dados LiDAR

Foram coletados dados de laser aerotransportados em 753 transectos com 375 hectares (12,5 x 0,3 km) cada. O levantamento laser foi realizado com o sensor LiDAR HARRIER 68i, acoplado a uma aeronave CESSNA modelo 206. O ângulo de varredura foi de 45 graus e altitude de voo de aproximadamente 600 metros, resultando numa largura bruta do transecto de 495 metros. A densidade mínima foi de 4 pulsos por metro quadrado, com diâmetro da projeção do feixe sobre a superfície, ou *footprint*, de aproximadamente 30 centímetros.

A distribuição dos transectos foi realizada de maneira aleatória dentro de áreas de floresta. A definição de floresta madura e secundária foi feita com base nos dados do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (**PRODES, INPE, 2016**) e Projeto TerraClass (TerraClass, **INPE, 2014**). Um pequeno percentual de transectos foram

direcionados a fim de cobrir regiões contendo parcelas de inventário florestal dos grupos: Paisagens Sustentáveis, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) - Acre e Laboratório de Manejo Florestal (LMF) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

Os retornos de solo de cada transectos foram classificados utilizando o filtro de Kraus e Pfeifer (1998) e em seguida, foi gerado um MDT com resolução de 1 metro. Posteriormente, foram descontadas a elevação do terreno de cada retorno para se obter uma nuvem de pontos normalizada, no qual o valor de Z representa a altura dos retornos em relação ao solo.

A extração dos máximos locais foi realizada por meio de um filtro aplicado às nuvens de pontos normalizadas. O ponto mais alto do transecto era localizado e uma esfera com raio de 30m era criada envolta deste ponto. Se o número de pontos dentro da esfera fosse menor do que 100, o ponto era considerado como outlier e descartado. O processo se repetia com o próximo ponto mais alto da nuvem. Caso o número de pontos dentro da esfera fosse maior do que 100, o ponto era considerado como parte da copa da árvore mais alta da nuvem. Após a identificação da maior árvore, um cilindro com raio de 50m, tendo o ponto mais alto como centro da base do cilindro, era recortado da nuvem de pontos gerando uma nova nuvem contendo a árvore mais alta. Em seguida, foi realizada uma inspeção manual em todas as nuvens para garantir que os pontos classificados como mais altos não fossem derivados de artefatos (ruídos), e sim, representassem os indivíduos arbóreos com maior altura. Por fim, foi produzido um mapa em escala Amazônica com a localização das maiores árvores por transecto.

3.3 Variáveis ambientais

Para investigar os fatores que influenciam a variação em altura das árvores emergentes, foram consideradas quatro variáveis ambientais: solo, vegetação, clima e relevo. É possível obter mapas referentes a estas variáveis ambientais de diversas fontes disponíveis na literatura (TAB. 1).

Tabela 1 – Mapas de fatores ambientais usados nas análises

Fatores ambientais	Mapas	Descrição	Nº de classes*	Escala	Resolução espacial
Vegetação	Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE; USGS, 1992)	Mapa de vegetação, digitalizado por U.S. Geological Survey	34	Nacional	1: 5 000 000
	Mapa de Vegetação da Amazônia Legal (SIVAM, 2002)	Baseado no mapa do projeto RADAMBRASIL, atualizado pelo projeto SIVAM	16	Nacional	1: 250 000
	Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2004)	Inclui formações florestais e não florestais de acordo com fisionomias vegetais, sensoramento remoto utilizado	38	Nacional	1: 5 000 000
	Mapa de Solo do Brasil (IBGE, 2001)	Solos classificados segundo o SiBCS da EMBRAPA, mapa publicado pelo IBGE e pela EMBRAPA.	14	Nacional	1: 250 000
Solo	Mapa de Solos da Amazônia Legal (MMA, 2002)	Esse mapa faz parte do Zoneamento Ambiental e Ecológico (ZEE) da Amazônia Legal	31	Regional	1: 250 000
	Mapa de estoques de carbono do solo (BERNOUX <i>et al.</i> , 2002)	O estoque de carbono no solo é uma combinação de solos globais do IPCC com classes de vegetação.	48	Nacional	-
	Mapa de solos (QUESADA <i>et al.</i> , 2011)	Mapas de solos com referência particular aos locais da RAINFOR. Distribuições de solos em toda a bacia amazônica sob vegetação florestal	13	Regional	1: 5 000 000
Clima	Mapa de Clima do Brasil (IBGE, 2002)	Mapa temático do Brasil, atualização do mapa climático produzido por Edmon Nimer e equipe em 1974	6	Nacional	1: 5 000 000
	Mapa de Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal (IBGE, 2014)	Dados provenientes de estações climatológicas e pluviométricas, série temporal de 1960 - 1990	8	Regional	1: 5 000 000
Topografia	Mapa dos Compartimentos de Relevo do Brasil (MMA, 2002)	Mapa de relevo 2002 (Compartimentos do relevo do Brasil – 2002)	38	Nacional	1: 250 000
	Mapa de Unidades de Relevo do Brasil (IBGE, 2006)	Mapa temático, baseado no projeto RADAMBRASIL e aprimorado com produtos de sensoramento remoto	91	Nacional	1: 5 000 000

Fonte: autora. *O número de classes refere-se à área de estudo e a classificação escolhida em cada mapa

O Mapa de Solos do Brasil, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) / EMBRAPA, em 2001, faz parte da série de “Mapas Murais”, que inclui outros temas como relevo, solos, geologia, unidades de conservação, fauna e flora. Os diferentes tipos de solos no Brasil foram identificados utilizando a nomenclatura e as especificações recomendadas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). O mapa é apresentado na escala de 1: 5.000.000, e foi preparado a partir de compilações, atualização e conversão para o meio digital, de levantamentos de solos produzidos pelo Projeto RADAMBRASIL (1973-1983). O projeto foi dedicado à cobertura de diversas regiões do território brasileiro, em especial a Amazônia, por imagens aéreas de radar, captadas por avião, e gerou inúmeras “cartas de serviço” na escala de 1: 250.000.

O mapa de Solos da Amazônia Legal foi produzido pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em 2006, utilizando dados que fazem parte do banco de dados do Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal (ZEEAM). Seu desenvolvimento ocorreu no contexto no projeto Cenários para a Amazônia Legal, que utilizou como base de trabalho inicial as informações do Diagnóstico Ambiental da Amazônia Legal produzido pelo IBGE, com informações do próprio IBGE e de outras instituições. Este mapa levou em consideração a textura e o relevo do solo e foi produzido na escala de 1: 2.500.000.

O mapa dos estoques de carbono do solo produzido por Bernoux *et al.* (2002) foi derivado da combinação dos mapas de solo (EMBRAPA, 1981) e vegetação (IBGE, 1988) do Brasil, ambos na escala de 1: 5.000.000. Algumas adaptações foram feitas nos mapas para melhor atender ao objetivo do autor. O mapa de solos da EMBRAPA (1981), que possuía 69 categorias de tipos de solos, foi simplificado em seis, baseadas nos critérios de classificação recomendados pelo IPCC/UNEP/OECD/IEA (1997, p. 5.38), como textura do solo, saturação da base e status da água no solo. Cada um dos seis tipos de solo relaciona-se com diversas classes de solos originais do mapa da EMBRAPA, que foram agrupadas nas categorias: solos minerais de argila com elevada capacidade de troca catiônica (CTC), denominados HAC (≥ 24 cmolc kg^{-1}); solo mineral de argila de argila de baixa CTC (< 24 cmolc kg^{-1}), separados em LAC Latossolos e LAC não Latossolos; solos arenosos; solos úmidos e “outros solos”, contendo todos os solos que não correspondiam aos demais grupos. O mapa de vegetação do Brasil (IBGE, 1988), que originalmente continha 94 classes de vegetação, divididas em grupos principais e subgrupos, também foi simplificado. A estratégia adotada foi utilizar os 12 grupos principais originais como ponto de partida e dividi-los de acordo com a especificidade da vegetação e/ou localização geográfica, resultando assim em 15 categorias de vegetação.

O mapa de solo de Quesada *et al.* (2011), produzido em escala da bacia amazônica, foi feito com referências de áreas florestais e dados do solo, resultando em um mapa de distribuição dos principais tipos de solo que ocorrem sob vegetação florestal. O conjunto de dados de Solo e Terreno para a América Latina e Caribe (SOTERLAC), versão 2.0, na escala de 1:5 milhões foi usado como base para definição das classes de solo e sua distribuição espacial (DIJKSHOORN *et al.*, 2005). O conjunto de dados de solo inicial foi agregado em 14 categorias principais para abranger toda a variabilidade por Grupo de Referência de Solos (RSG) da abordagem da Base de Referência Mundial (WRB) para a classificação do solo (IUSS *Working Group* WRB, 2006). As áreas não florestais foram excluídas das análises usando como referência um mapa de vegetação (SAATCHI *et al.*, 2008) derivado de dados do Projeto RADAMBRASIL, com 1km de resolução espacial, capaz de discriminar 16 tipos de cobertura da terra. Das 16 classes, 11 faziam referência a áreas florestais, e foram agregadas em uma única classe denominada “floresta”.

O mapa de Clima do Brasil (IBGE, 2002) é uma atualização do mapa climático idealizado e produzido por Edmon Nimer e sua equipe, em 1974. O mapa reflete os climas zonais (Equatorial, Tropical e Temperado) e suas subunidades regionais, as regiões térmicas (Mesotérmico Mediano e Brando, Subquente e Quente) e os padrões de umidade e seca mensais (que vão de Superúmido até Semiárido). A ocorrência e a distribuição da precipitação são refletidas na informação referente ao número de meses secos no intervalo de um ano.

A carta do Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal produzido pelo IBGE (2014) buscou avaliar as condições climáticas na região enquanto agente potencialmente transformador do subsistema natural. Esse potencial de transformação foi representado pelos autores por meio de uma avaliação dos graus de agressividade, ou Índice de Agressividade Climática. Para compreender os padrões dos regimes dominantes e posteriormente definir as áreas em diferentes graus de agressividade, a precipitação pluviométrica foi adotada como variável básica, dada sua relevância nos climas tropicais. A análise dos parâmetros foi direcionada no sentido de identificar as áreas de ocorrência de excessos e deficiências e avaliar a intensidade de tais ocorrências. Os autores utilizaram dados referentes a 326 estações climatológicas e pluviométricas, oriundas do Banco de Dados do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). As séries temporais analisadas foram homogeneizadas e referem-se ao período 1960 – 1990. Os graus de agressividade foram representados na carta do Potencial de Agressividade em três classes, denominadas ALTA (A), MÉDIA (M), e BAIXA (B). Para o estabelecimento destes diferentes graus, foram reconhecidos três fatores, expressos pelos

dígitos 1, 2 e 3, representando respectivamente o Excesso de Umidade, a Deficiência de Umidade e a Ocorrência de Ambos Fatores (TAB. 2).

Tabela 2 – Classe do potencial de agressividade climática

Classes	Fator	Características			
		Índice de concentração (%)	Nº de meses chuvosos	Nº de meses secos	Precipitação média anual (mm)
Alta (A)	1	< 35	12	0	> 3.000
	2	> 55	5 a 6	5 a 6	1.000 a 2.750
Média (M)	1	< 35 e de 35 a 45	9 a 12	0 a 2	2.250 a 3.000
	2	> 55 e de 45 a 55	5 a 6	4 a 5	1.250 a 2.000
	3	45 a 55	7 a 8	3	> 3.000
Baixa (B)	1	35 a 45 e de 45 a 55	8	2 a 3	1.750 a 2.500
	2	45 a 55	7	2 a 3	1.500 a 2.250
	3	45 a 55	7	3 a 4	1.750 a 2.250

Fonte: Potencial de Agressividade na Amazônia Legal (IBGE, 2014).

Fator é a causa predominante que explica o potencial de agressividade do clima

1. áreas caracterizadas pelo excesso de umidade durante todo o ano;
2. áreas caracterizadas pela deficiência de umidade durante todo o ano;
3. áreas caracterizadas pela deficiência de umidade durante um período do ano.

Índice de concentração refere-se ao percentual da precipitação total concentrado no trimestre mais chuvoso

Mês chuvosos = chuva mensal > 100mm

Mês seco = chuva mensal < 60mm

O mapa dos Compartimentos de Relevo do Brasil, na escala de 1: 250.000, faz parte da 4ª edição do Atlas Nacional do Brasil (IBGE, 2002) e apresenta as características geomorfológicas do território brasileiro, representadas através de 7 compartimentos de relevo. A representação geomorfológica está estruturada em uma metodologia consolidada, organizada por diferentes níveis hierárquicos, ou táxons. Desta forma, do maior nível hierárquico para o menor, tem-se: domínios morfoestruturais, baseados em critérios predominantemente geológicos e tectônicos; regiões geomorfológicas; unidades geomorfológicas; e modelados. Outra forma de representar o relevo que também podem contribuir para a compreensão dos diversos tipos de feições existentes na superfície terrestre é a identificação de compartimentos de relevo. Os compartimentos identificam feições genéricas de relevo, tais como serras, patamares e planaltos, sem individualização ou destaque para qualquer feição singular (IBGE, 2009).

A segunda edição do Mapa de Unidades de Relevo do Brasil (IBGE, 2006), na escala de 1: 5.000.000, permitiu uma compartimentação mais exata dos grandes conjuntos de relevo brasileiro em relação a classificação original da primeira versão, publicada em 1993. O número de unidades de relevo identificadas no país passou para 157, resultado do detalhamento de trabalhos realizados na Amazônia Legal, nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sul. Esse detalhamento foi possível devido ao desenvolvimento tecnológico, observação obtidas por meio de satélite Landsat 5 e 7 - TM e novas tecnologias de sensoriamento remoto e de posicionamento global, e por melhorias de acesso com novas estradas e equipamentos.

O Mapa de Vegetação do Brasil produzido pelo IBGE em 1992 na escala de 1: 5.000.000, foi resultado do primeiro mapeamento da vegetação em larga escala baseado em imagens de radar e trabalho de campo. Com origem nas cartas-imagens de radar produzidas pelo Projeto RADAMBRASIL (1983), o mapa representa uma provável reconstituição da situação da vegetação no território brasileiro na época do seu descobrimento. Posteriormente, um novo mapa de vegetação na escala de 1:250.000 foi publicado na 4ª edição do Atlas Nacional do Brasil (IBGE, 2002), atualizado com base no projeto Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM).

Resultado da parceria entre o IBGE e o MMA, em 2004, foi lançado o Mapa de Vegetação do Brasil, que também faz parte da série de “Mapas Murais” do IBGE, na escala de 1:5.000.000. O mapa reconstitui a cobertura vegetal original do Brasil e traz aprimoramentos na delimitação das Regiões Fitoecológicas com base em interpretações de imagens obtidas pelo satélite Landsat 5-TM aliadas a novas técnicas, pesquisas bibliográficas e de campo.

As camadas vetoriais referentes aos fatores ambientais tiveram as geometrias inválidas corrigidas e foram recortadas tendo como referência os limites da Amazônia Legal (MMA, 2014). Uma vez que eram categóricas, as classes passaram por uma reclassificação, onde foram atribuídos a cada classe um número de identificação que posteriormente foi usado como base para rasterizar a camada. Em seguida, utilizando como base a localização das maiores árvores por transecto, foi extraído o valor referente a cada categoria presente nos mapas de fatores ambientais. Ao final, obtivemos uma tabela contendo a localização das árvores e sua respectiva classe em cada mapa dos fatores ambientais.

3.4 Análise estatística

A variabilidade das alturas emergentes dentro dos diferentes mapas de fatores ambientais (solo, topografia, clima e vegetação) foi medida em termos de variação populacional (Eq. 1) e variação estratificada (Eq. 2), considerando as diferentes classes ou estratos de cada ambiente nos mapas de fatores (Tejada *et al.*, 2019).

Equação 1. Variância global

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_i - \mu)^2}{N}$$

Em que X_i é uma observação; μ é a média da população; e N é o tamanho da população.

Equação 2. Variância estratificada

$$s^2 = \sum_i^n \left(n_j / N \right)^2 * s_j$$

Em que s^2 é a variação total estratificada, n é o tamanho do estrato j , N é o tamanho da população e s_j é a variação amostral do estrato j .

Calculando a variância, espera-se que em cada classe de um mapa de fator ambiental seja homogênea. Portanto, a altura emergente deve ser mais semelhante em uma classe do que no mapa como um todo. Foi realizada a análise de variância estratificada para identificar em quais mapas dos fatores ambientais (e classes) as alturas possuem menor variância estratificada. Considerando que uma classe de fatores ambientais com baixa variância de altura representa melhor as classes de altura.

Para entender se houve diferença significativa da variável altura entre os estratos em cada mapa de fator ambiental, foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (K-W), uma vez que a variável não apresentou distribuição normal segundo o Teste de Shapiro-Wilk (1965). O teste K-W é um método alternativo à Análise de Variância Simples (ANOVA) para um fator quando as suposições exigidas pela ANOVA não são atendidas (KRUSKAL & WALLIS, 1952). O nível de significância foi estabelecido para um valor de $p < 0,05$. Os estratos

que possuíam seis observações ou menos não foram considerados nas análises uma vez que o teste K-W exige um mínimo de três grupos, com pelo menos seis observações em cada, para a realização das análises, caso contrário o teste perde seu poder estatístico (KRUSKAL & WALLIS, 1952).

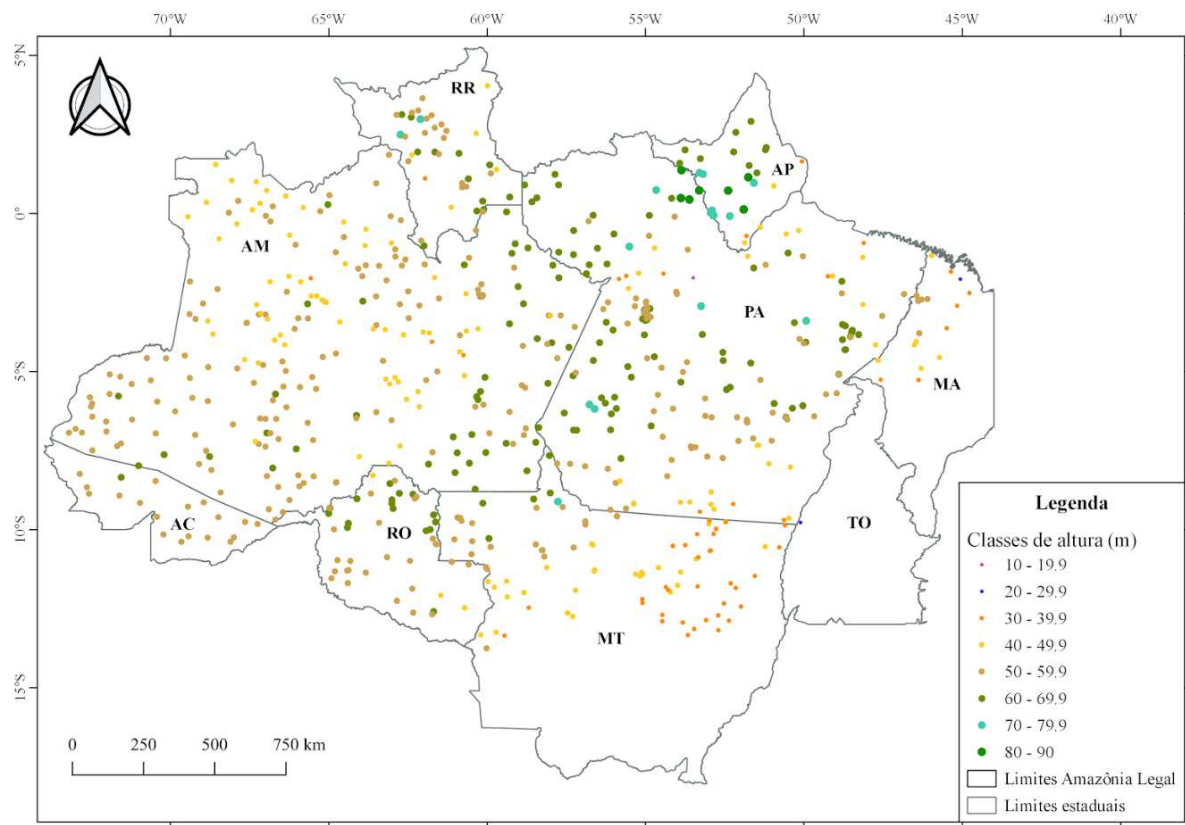
Os gráficos e os testes estatísticos foram processados no *software* R 3.4.2 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017). A construção final dos mapas, conforme apresentado nos resultados, ocorreram no programa QGIS 2.18.14 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2017). Para os mapas apresentados na seção resultados foram adotados o sistema de coordenadas geográficas sistema geodésico de referência WGS84.

4 RESULTADOS

4.1 Mapa de alturas emergentes

As árvores emergentes mais altas estão localizadas nos estados do Amapá, Roraima, noroeste do Pará e nordeste do Amazonas. Já nas regiões sul e sudoeste da Amazônia, nos estados do Pará, Mato Grosso, e Rondônia, estão concentradas árvores emergentes nas menores classes de altura (FIG. 4). Dentre as alturas do conjunto de dados, o indivíduo mais alto possui 88,5 m e o mais baixo, 17,6 m, com uma média de 54,3 metros e mediana de 54,9 metros. A variância global foi de 91,37 m² e o desvio padrão de 9,6 metros.

Figura 4 – Espacialização das maiores árvores de cada transecto por classe de altura



Fonte: autora.

4.2 Variáveis ambientais

Comparando os quatro mapas de solos analisados, o mapa dos estoques de carbono do solo (BERNOUX *et al.*, 2002) foi o que apresentou menor variância estratificada (VE) e desvio padrão (DP) da altura, enquanto o mapa de distribuição dos solos em toda a bacia amazônica sob vegetação florestal (QUESADA *et al.*, 2011) foi o que apresentou o maior valor de VE e DP da altura (TAB. 3).

Tabela 3 – Comparação entre camadas de solo

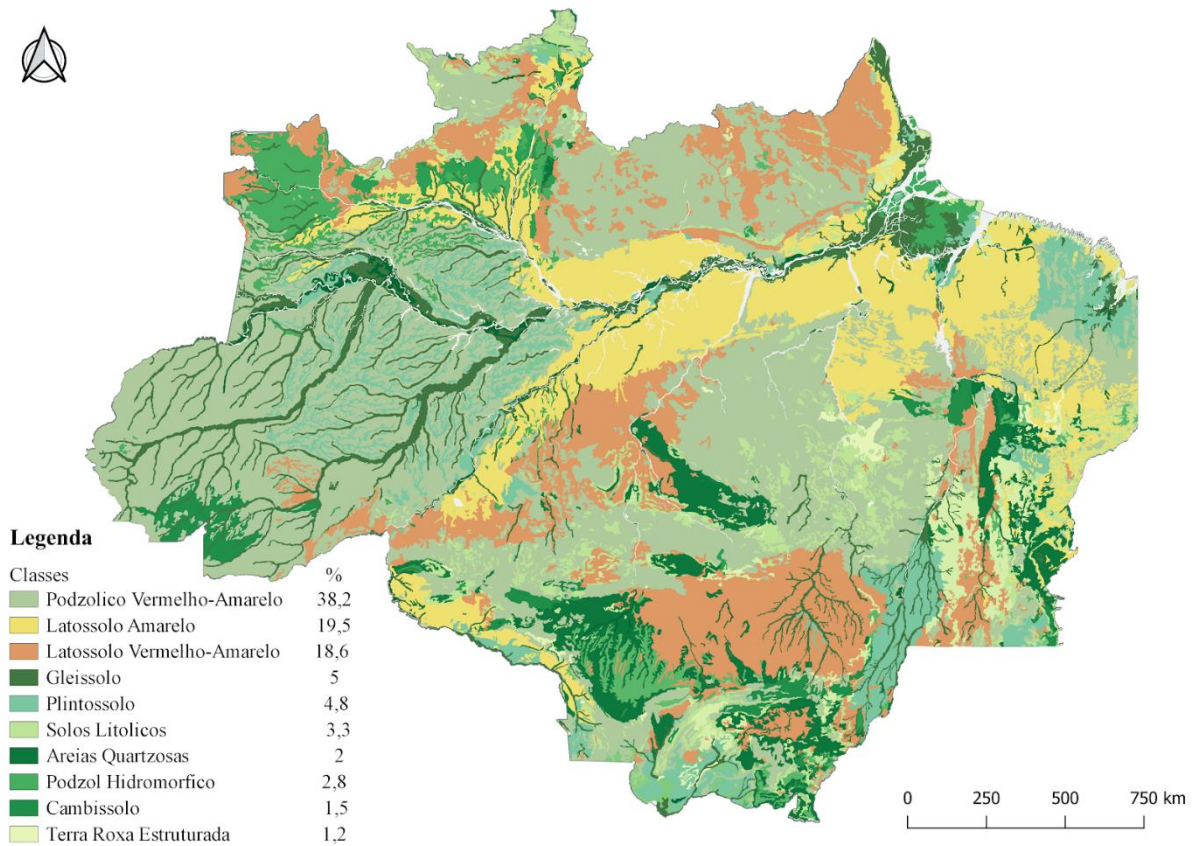
Camada	VE	DP (m)
BERNOUX (2002)	10,3230	3,21
MMA (2006)	19,9743	4,47
IBGE (2001)	26,0860	5,11
QUESADA (2011)	52,4749	7,24

Fonte: autora.

A distribuição das alturas nas classes de solo foi semelhante em todos os mapas, com árvores mais altas predominando, em Argissolos e Latossolos. Como o fator vegetação teve uma camada exclusiva, optou-se por analisar uma camada que levasse em consideração apenas o fator solo e tivesse a maior queda na VG, que no caso, foi o mapa do MMA.

O Mapa de Solos da Amazônia Legal (MMA, 2006) contém 31 classes, das quais, em apenas 18 foi observado a presença de árvores emergentes. Foi feita uma eliminação das classes onde o número de árvores não foi representativo ($n \leq 6$), restando por fim 10 classes para as análises estatísticas. O número de árvores presentes em cada classe foi calculado e expresso em porcentagem (FIG. 5).

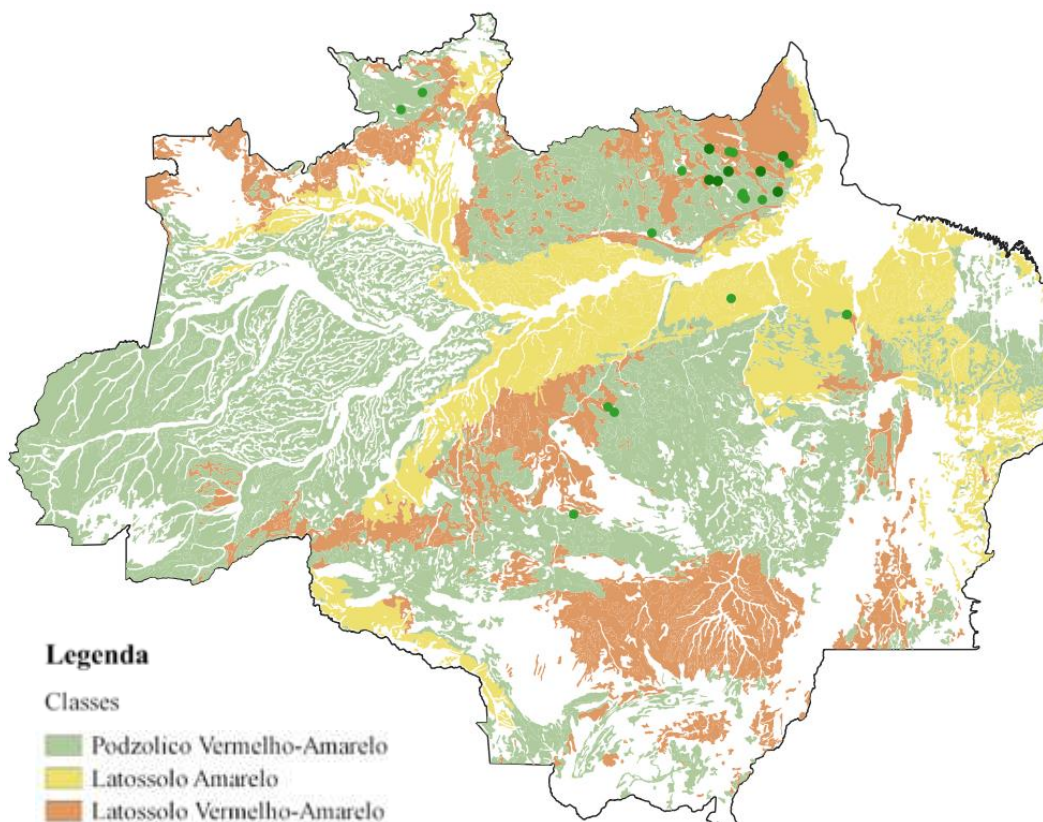
Figura 5 – Mapa de Solos da Amazônia Legal e % de árvores por classe



Fonte: MMA (2004).

Aproximadamente 60% das árvores emergentes acima de 70m de altura estão localizadas na classe dos Podzólicos vermelho-amarelos (PVA), antiga classificação da EMBRAPA para Argissolos. A classe dos Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA), abriga 25% dessas árvores, e os 15% restantes dessas árvores estão localizados em Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Vermelho-escuro e Solos litólicos, antiga classificação da EMBRAPA para Neossolo Litólico (FIG. 6).

Figura 6 – Distribuição das árvores emergentes acima de 70m de altura

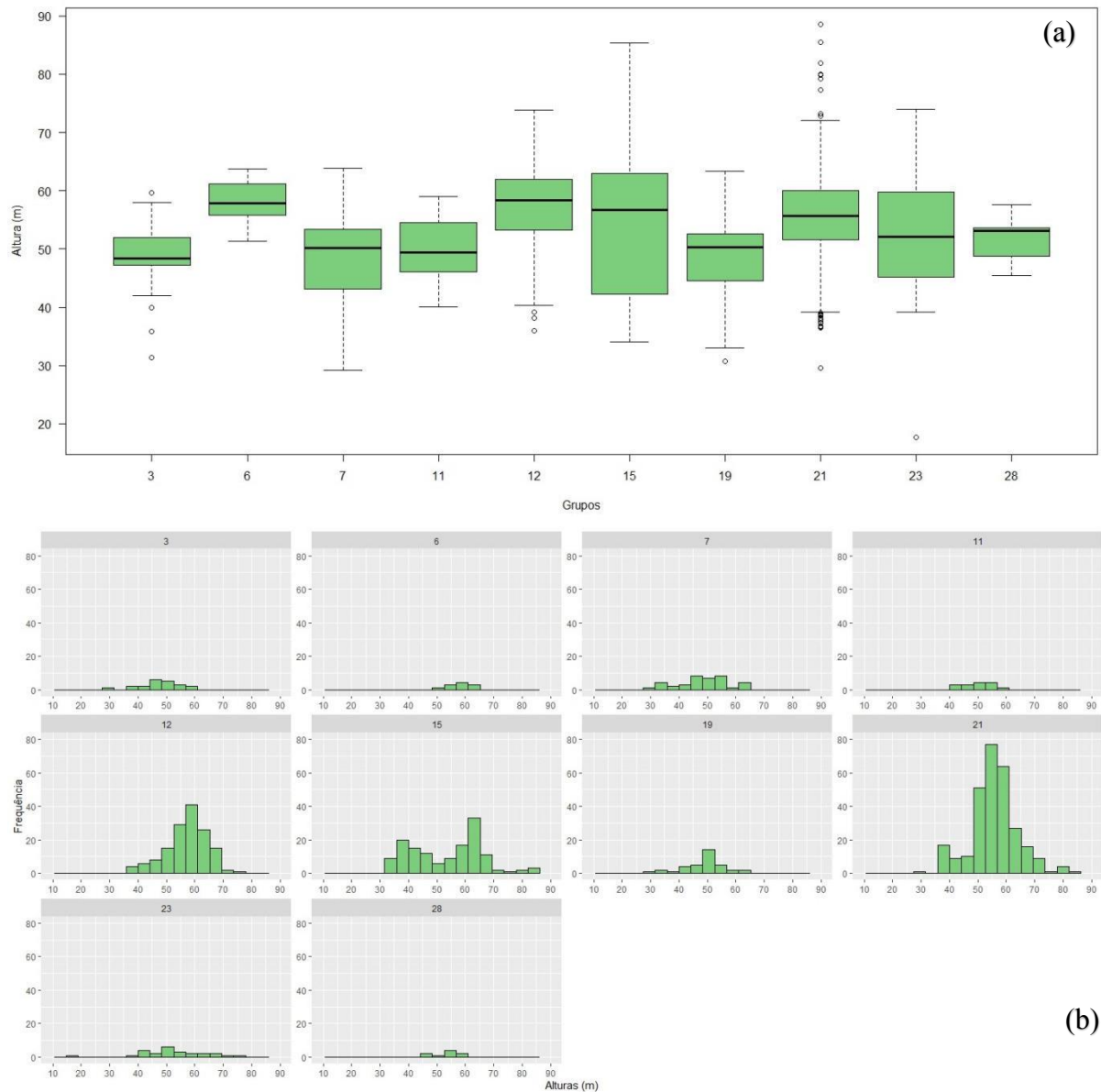


Fonte: autora.

A mediana variou entre 48m, no grupo de Areias Quartzosas, e 58m no grupo dos LA. Os grupos com maiores valores de mediana foram, respectivamente, LA, Cambissolos, LVA e PVA, todos com valores acima de 55 metros. Apesar do grupo LA apresentar o maior valor de mediana, a árvore mais alta identificada no banco de dados, foi encontrada no grupo PVA. A menor árvore do banco de dados está localizada no grupo denominado Solos Litólicos (FIG. 6).

A análise de variância por estratos mostrou que as variâncias mais elevadas se encontram nas classes de PVA, LVA e LA. Segundo o Teste de Dunn (1964), as classes PVA e LVA são estatisticamente iguais, enquanto a classe LA é significativamente diferente das duas. Os gráficos e as tabelas com as estatísticas descritivas de todas as camadas estão disponíveis no Apêndice A. As legendas detalhadas completas de todas as camadas podem ser consultadas no Apêndice B.

Figura 7 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de solo



Fonte: autora. Classes de solo: (3) Areias Quartzosas; (6) Cambissolo; (7) Gleissolo; (11) Podzol Hidromórfico; (12) Latossolo Amarelo; (15) Latossolo Vermelho Amarelo; (19) Plintossolo; (21) Podzólico Vermelho-Amarelo; (23) Solos Litólicos; (28) Terra Roxa Estruturada.

O padrão de distribuição das alturas das árvores emergentes no mapa de Clima do Brasil (IBGE, 2002) e na carta Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal (IBGE, 2014) foi semelhante. As árvores mais altas predominaram em áreas caracterizadas pelo excesso de umidade durante o ano todo. Por apresentar maior consistência nos dados agrupados do que o mapa de 2002, e, portanto, menor VE e DP da altura, as análises estatísticas apresentadas serão referentes ao mapa de 2014 (TAB. 4).

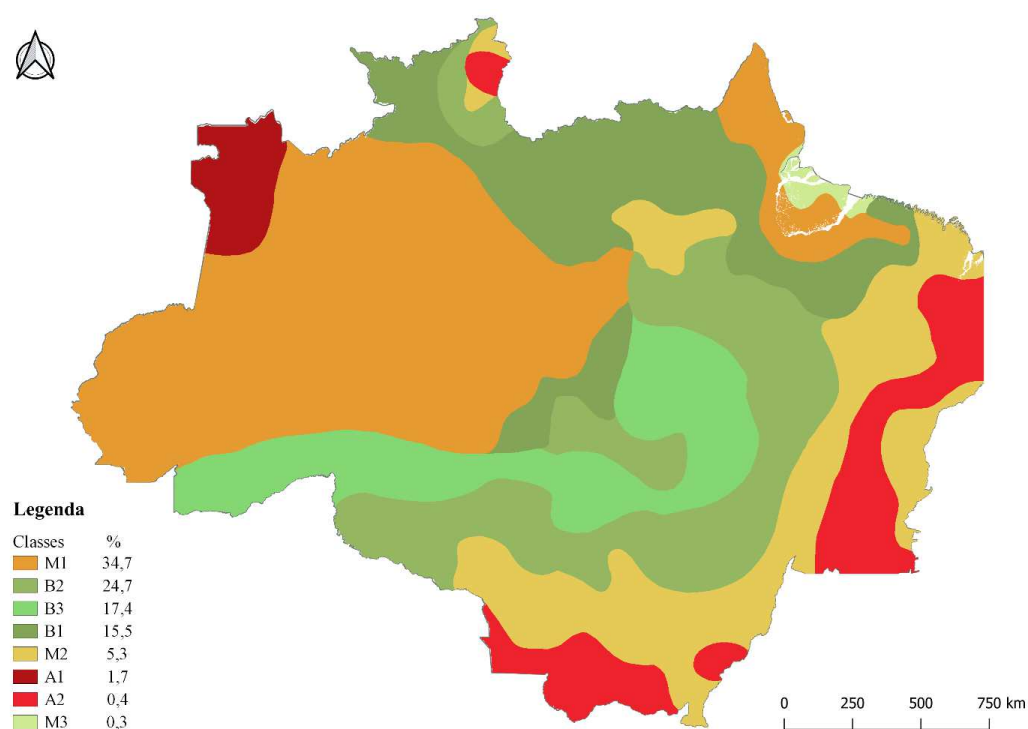
Tabela 4 – Comparação entre camadas de clima

Camada	VE	DP (m)
IBGE (2014)	8,3343	2,89
IBGE (2002)	16,0404	4,01

Fonte: autora.

As árvores emergentes encontram-se distribuídas por todas as oito classes da carta de potencial de agressividade climática. Apenas duas classes foram eliminadas por não apresentarem número representativo de árvores ($n \leq 6$), restando assim, seis classes para a realização das análises estatísticas. O número de árvores presentes em cada classe foi calculado e expresso em porcentagem (FIG. 8).

Figura 8 – Mapa de Potencial de Agressividade Climático na Amazônia Legal e % de árvores por classe



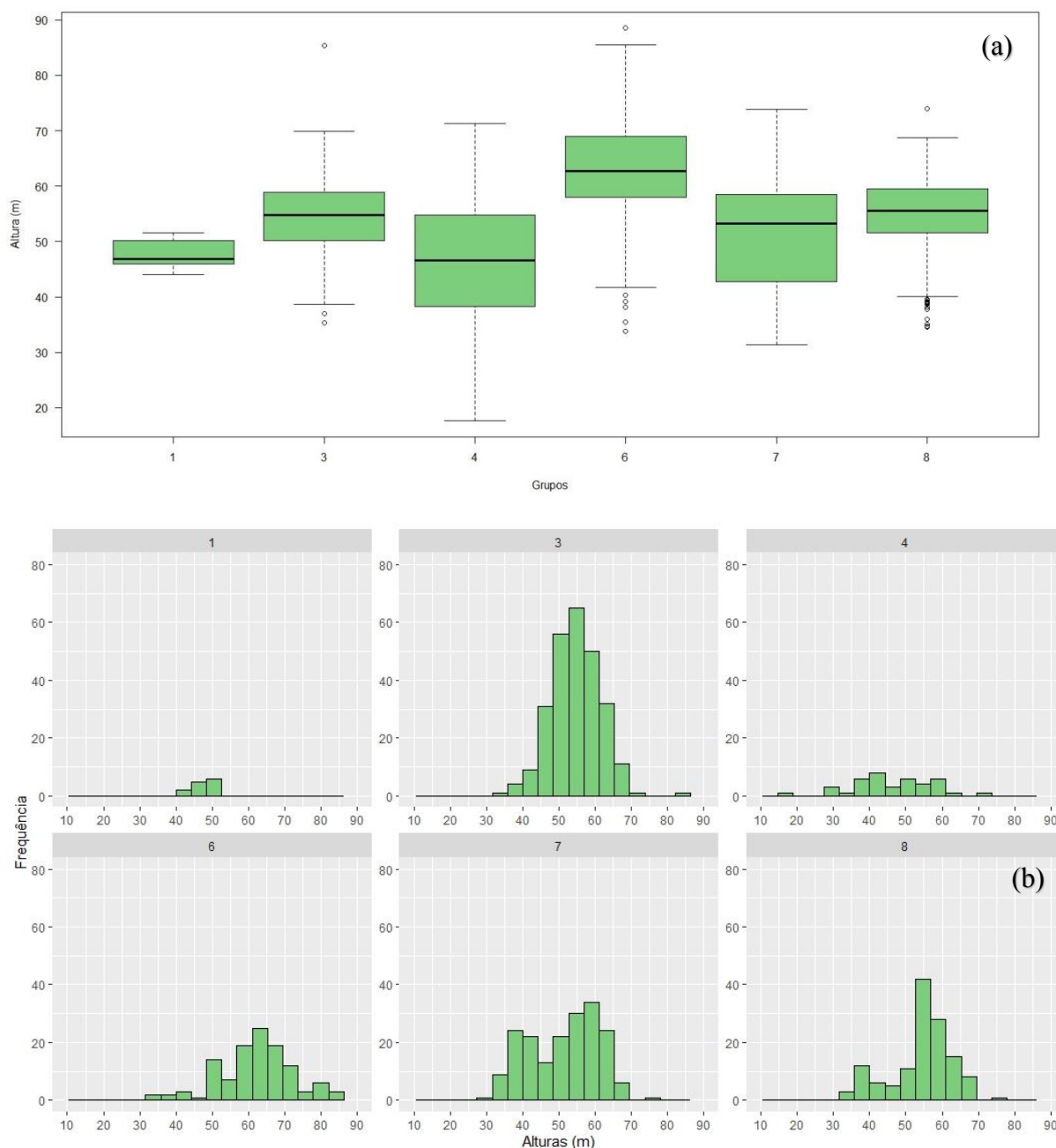
Fonte: IBGE (2014)

Quase 60% das árvores emergentes encontram-se localizadas nas classes de médio potencial agressivo caracterizadas com excesso de umidade o ano inteiro (M1) e de baixo potencial agressivo caracterizadas por deficiência de umidade durante todo o ano (B2). As áreas classificadas como M1 são caracterizadas por chuvas intensas, abundantes e frequentes, número de meses com precipitação superior a 100 mm da ordem de 9 a 12, e precipitação média anual

variando de 2250 mm a 3000 mm. Já as áreas classificadas como B2 são marcadas pela estacionalidade das chuvas e encontram-se tipicamente na fronteira entre os biomas da Savana (Cerrado) e o da Floresta Ombrófila. A precipitação média anual varia de 1500 mm a 2250 mm com estação chuvosa se prolongando por um período considerável, de 7 meses ao ano, porém com concentração das chuvas no trimestre mais seco de média intensidade (45% a 55%).

O menor valor de mediana (46,6 m) foi referente ao grupo de médio potencial agressivo com áreas caracterizadas por deficiência de umidade o ano todo (M2). A classe M2 foi a que apresentou o maior DV, com valores de altura variando de 17,6 m a 71,3 m (FIG. 9). As áreas classificadas como M2 são predominantemente formadas por Savanas, seguida das áreas de Tensão Ecológica (Savana/Floresta Estacional e Savana/Floresta Ombrófila) e da Floresta Ombrófila. Os totais anuais das chuvas variam de 1250 mm a 2000 mm e o período chuvoso se concentra em 5 a 6 meses do ano. A umidade relativa anual é inferior a 85% e a insolação ultrapassa as 2200 horas anuais.

O maior valor de mediana (62,7 m) foi referente ao grupo de baixo potencial de agressividade com áreas caracterizadas por excesso de umidade durante todo o ano (B1). Cerca de 82% das árvores acima de 70 m estão presentes nessas áreas. As áreas classificadas como B1, apesar de estarem localizadas nos domínios da Floresta Ombrófila Densa, apresentam menor disponibilidade de umidade ao longo do ano, traduzida pelo menor total pluviométrico (1750 mm a 2250 mm anuais), menor número de meses chuvosos (cerca de 8 ao ano), concentração das chuvas fraca (35% a 45%) e média (45% a 55%) respectivamente, e menor período de estiagem (2 a 3 meses ao ano).

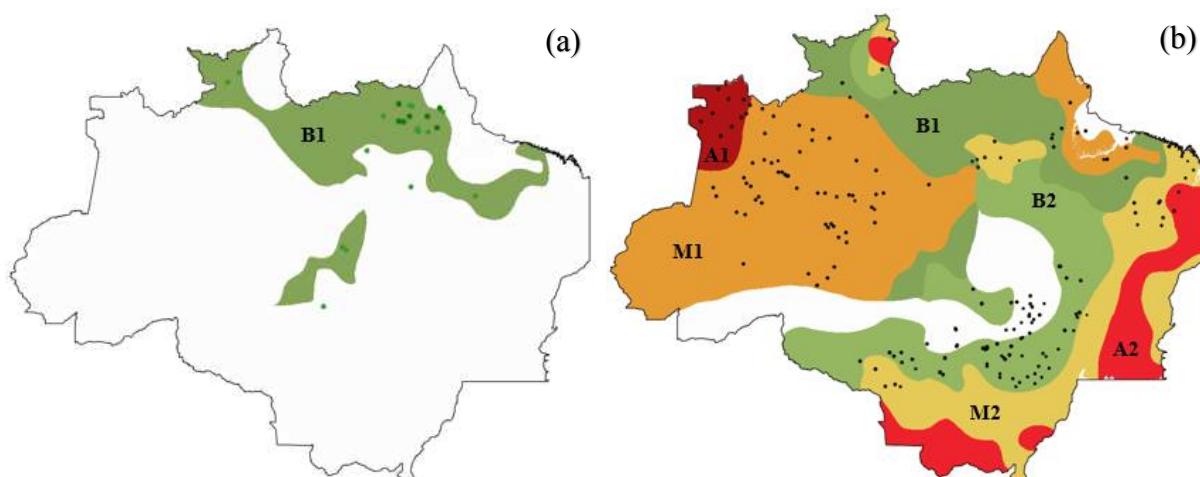
Figura 9 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de clima

Fonte: autora. Classes de potencial de agressividade climática: (1) A1; (3) M1; (4) M2; (6) B1; (7) B2; (8) B3.

Árvores acima de 70 metros de altura foram encontradas, predominantemente, em locais caracterizados por excesso de umidade, com baixo potencial agressivo. Porém, nestas mesmas áreas caracterizadas por excesso de umidade com potencial de agressividade média e alta, também foram encontradas árvores com menores valores de altura, com até 50 m de altura. Em áreas caracterizadas pela deficiência de umidade também foram apontadas árvores com menores valores de altura (FIG. 10).

Nas classes de baixo potencial de agressividade climática B1 e B2, as alturas apresentaram-se mais heterogêneas, com elevado valor de variância estratificada. Essas classes diferem-se estatisticamente, segundo o teste de Dunn, sendo que a classe B1 apresenta maior capacidade de suportar árvores maiores.

Figura 10 – Distribuição das árvores emergentes nas classes de potencial de agressividade climática



Fonte: autora. (a) Árvores acima de 70m em altura. (b) Árvores até 50m em altura. Fundos coloridos indicam as classes de potencial de agressividade climática determinadas no mapa de Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal (IBGE, 2014).

O mapa de Unidades de Relevo (IBGE, 2006) apresentou menor valor de VE e DP do que o mapa de Compartimentos do Relevo (IBGE, 2002). As atualizações do mapa de 2006 incluíram novas classes de unidades de relevo tornando-as mais homogêneas e portanto, representando melhor as classes de altura. O comportamento da distribuição das alturas nas classes de relevo foi semelhante nos dois mapas, com árvores mais altas localizadas predominantemente em grupamentos de formas de relevos presentes no Domínio morfoestrutural dos Crátons Neoproterozóicos, ou seja, áreas formadas por escudos cristalinos (TAB. 5).

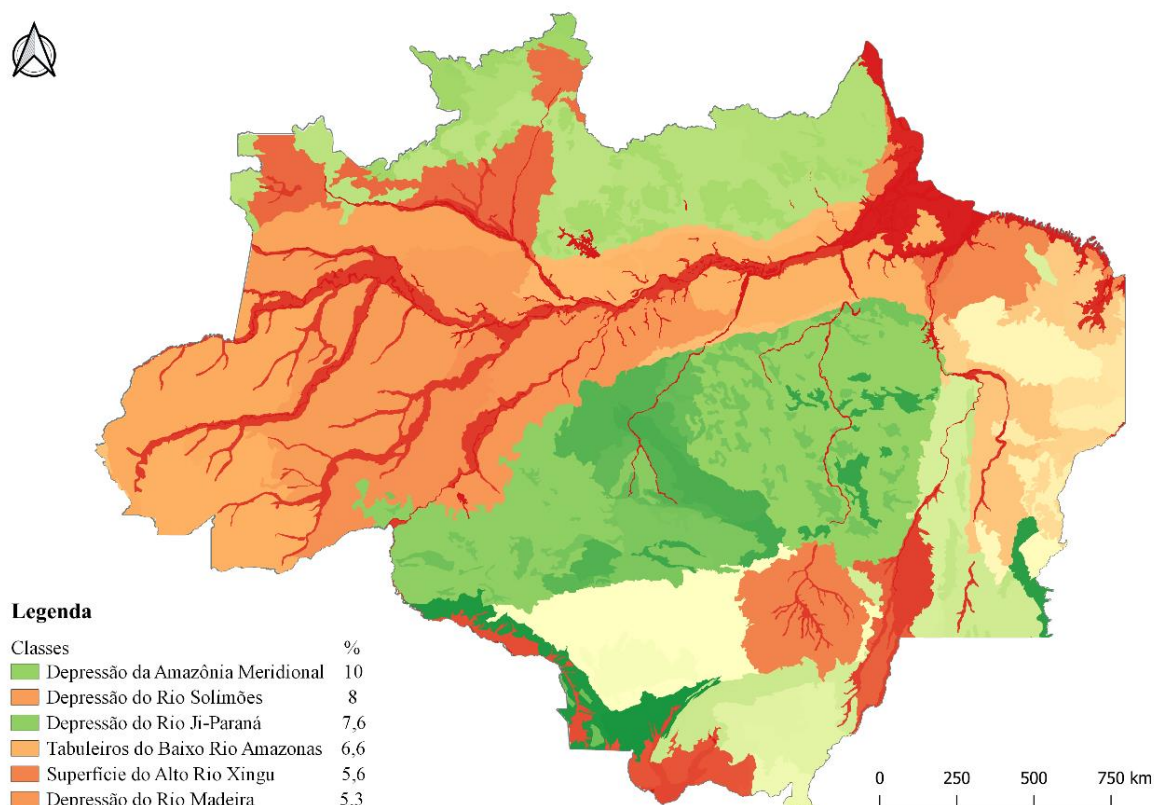
Tabela 5 – Comparação entre camadas de relevo

Camada	VE	DP (m)
IBGE (2006)	2,1845	1,48
IBGE (2002)	6,8715	2,62

Fonte: autora.

O mapa de unidades de relevo (IBGE, 2006), para a área de estudo, possui 91 classes de relevo, das quais, foram observadas presença de árvores emergentes em 47 delas. Foi feita uma eliminação das classes onde o número de árvores não foi representativo ($n \leq 6$), restando por fim 28 classes para as análises estatísticas. O número de árvores emergentes presentes em cada classe foi calculado e expresso em porcentagem (FIG. 11).

Figura 11 – Mapa de Unidades de Relevo da Amazônia Legal e % de árvores emergentes das seis classes com maior %

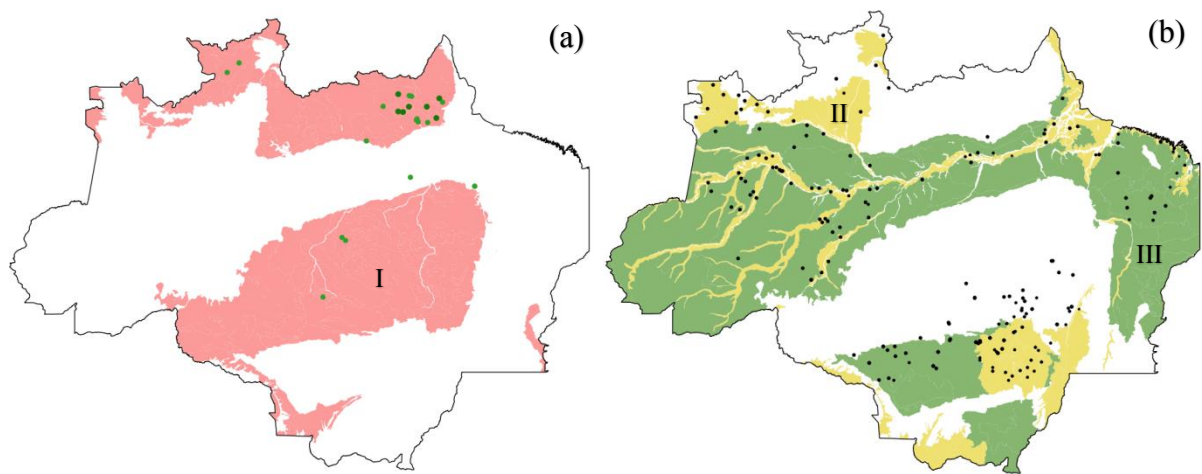


Fonte: IBGE (2006).

O grupo que apresentou o maior valor de altura, e de mediana, foi o dos Planaltos Residuais do Norte da Amazônia (PRNM). Nesses planaltos, estão localizadas 17% das árvores acima de 70 m de altura. Nos grupos referentes às unidades Depressão da Amazônia Setentrional e Colinas do Amapá, também foram encontradas árvores com alturas elevadas, com 29% das árvores acima de 70m localizadas nas depressões e 21% localizadas nas colinas. Todas estas três unidades de relevo estão localizadas no domínio morfoestrutural geocronologicamente mais antigo segundo a classificação hierárquica do IBGE, os Crátons Neoproterozóicos. O teste de Dunn não apontou diferenças significativas entre os grupos.

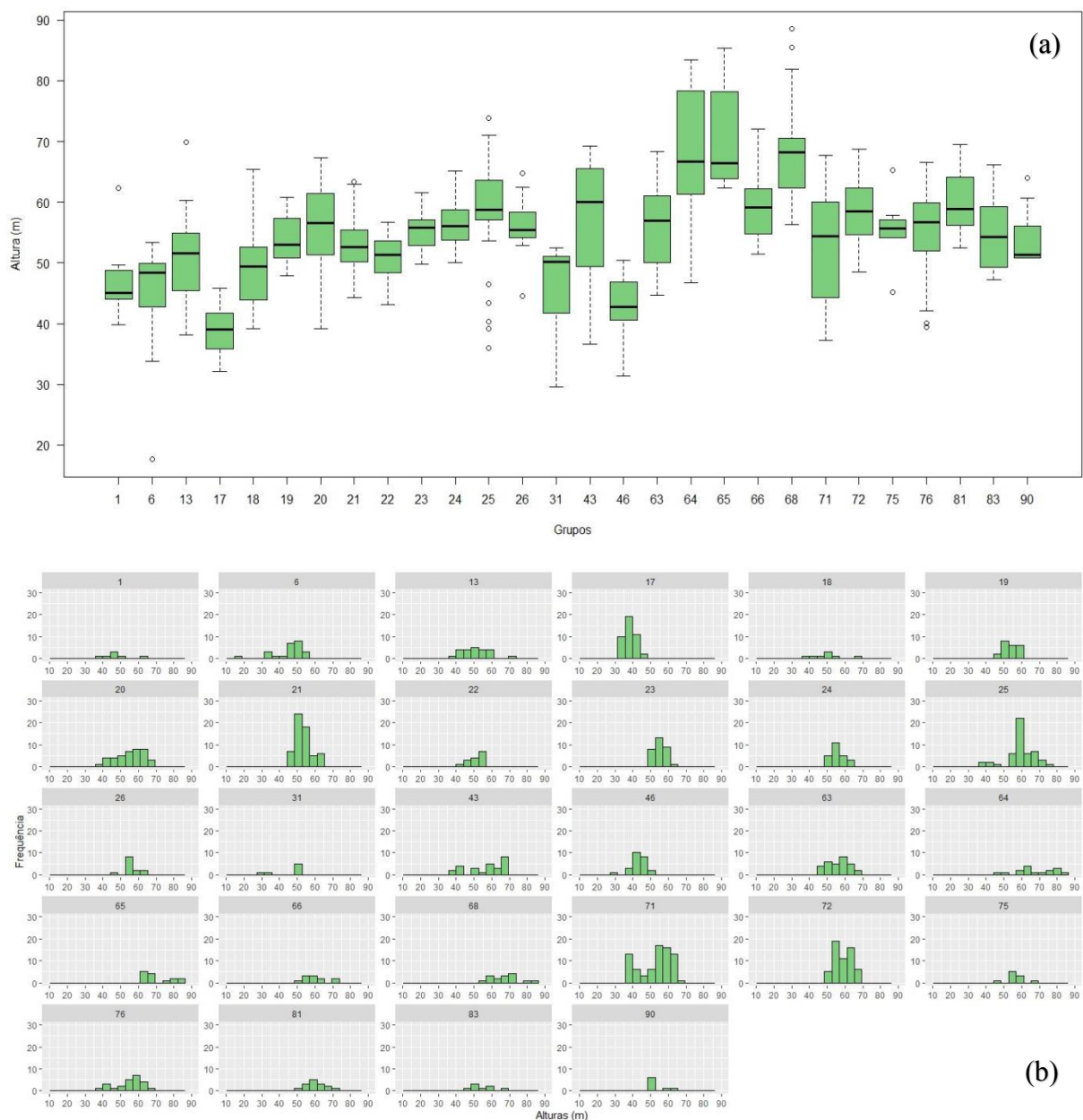
Valores de mediana até 50 metros de altura foram referentes às unidades de relevo: Planície Amazônica, Superfície do Alto Rio Xingu, Planaltos dos Parecis e Depressão dos Rios Negro/Japurá (FIG. 12). Todas pertencem a domínios morfoestruturais geo cronologicamente mais recentes na classificação hierárquica do IBGE, os Depósitos sedimentares quaternários e as Bacias e coberturas sedimentares Fanerozóicas. O menor valor de mediana da altura, 39 m, foi 57% mais baixa do que no grupo PRNM (FIG. 13).

Figura 12 – Distribuição das árvores emergentes nos Domínios Morfoestruturais



Fonte: autora. (a) Árvores emergentes acima de 70m de altura. (b) Árvores emergentes com até 50m de altura. Fundos coloridos indicam as subdivisões dos Domínios Geomorfológicos apresentados no mapa de unidades de relevo do IBGE (2006): I – Crátons Neoproterozóicos; II – Bacias e coberturas sedimentares fanerozóicas; III – Depósitos sedimentares quaternários.

Figura 13 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de unidade de relevo



Fonte: autora. Classes de unidade de relevo: (1) Massa d'água; (6) Planície Amazônica; (13) Depressão dos Rios Branco/Negro; (17) Superfície do Alto Rio Xingu; (18) Tabuleiros Costeiros; (19) Depressão do Rio Purus; (20) Depressão do Rio Madeira; (21) Depressão do Rio Solimões; (22) Depressão dos Rios Negro/Japurá; (23) Colinas dos Rios Javari/Juruá; (24) Colinas do Acre; (25) Tabuleiros do Baixo Rio Amazonas; (26) Planalto Rebaixado dos Rios Negro/Uatumã; (31) Superfície do Rio Gurupi; (43) Tabuleiros dos Rios Gurupi/Grajaú; (46) Planalto dos Parecis; (63) Pediplano dos Rios Branco/Negro; (64) Depressão da Amazônia Setentrional; (65) Colinas do Amapá; (66) Patamares de Roraima; (68) Planaltos Residuais do Norte da Amazônia; (71) Depressão da Amazônia Meridional; (72) Depressão do Rio Ji-Paraná; (75) Depressão do Norte de Mato Grosso; (76) Planaltos Residuais do Sul da Amazônia; (81) Planalto do Médio Rio Sucunduri; (83) Planalto do Cachimbo; (90) Depressão do Rio Guaporé.

A cada atualização dos mapas temáticos de vegetação produzidos pelo IBGE as tipologias florestais foram sendo melhor delimitadas, traduzindo-se em diminuição da variância de altura (TAB. 6). O comportamento da distribuição das alturas nas classes de vegetação foi semelhante em todos os mapas, com árvores mais altas localizadas, predominantemente em Florestas Ombrófilas Densas de Terra Firme. Assim, as análises detalhadas mostradas a seguir serão relativas a camada que apresentou menor valor de VE e DP, referentes a última atualização feita pelo IBGE em 2004.

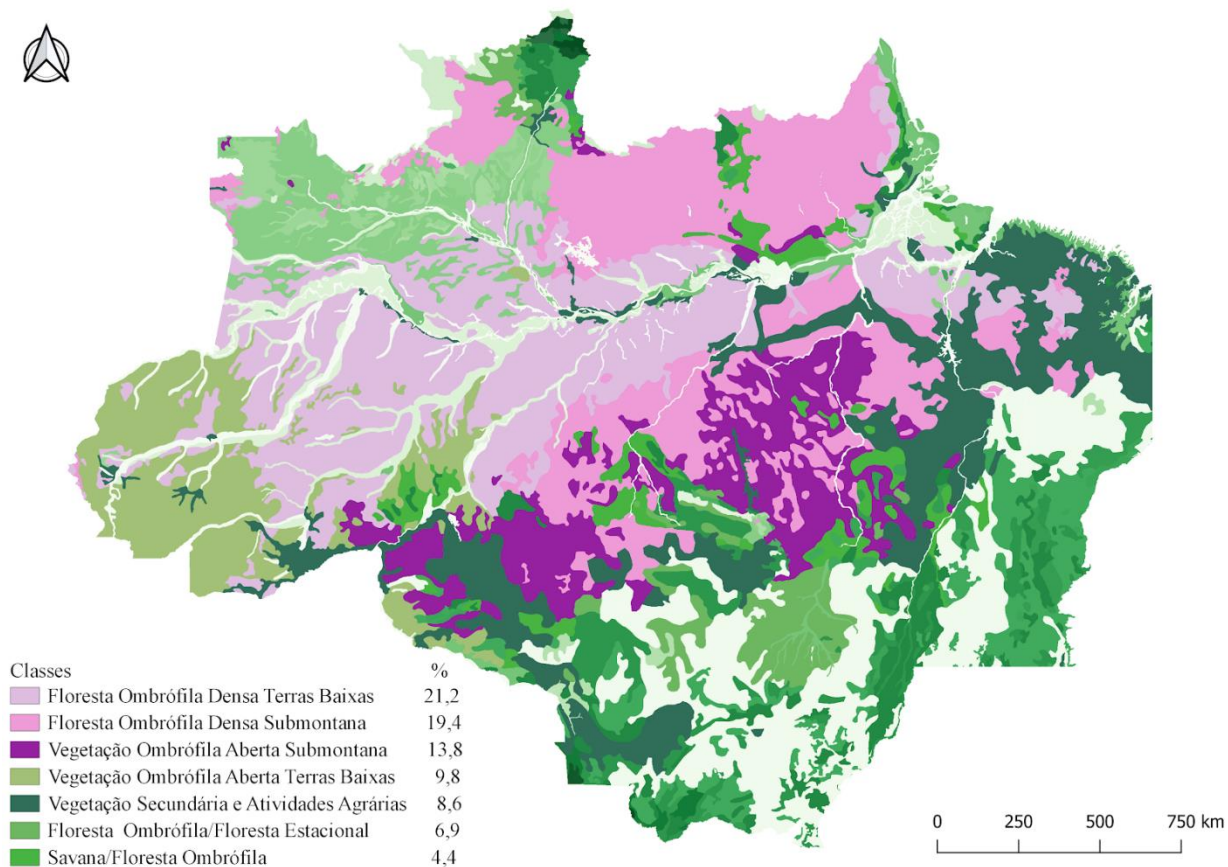
Tabela 6 – Comparação entre camadas de vegetação

Camada	VE	DP (m)
IBGE (2004)	4,9043	2,21
IBGE (2002)	5,6990	2,39
IBGE (1992)	8,6503	2,94

Fonte: autora.

O mapa do IBGE (2004), para a região da área de estudo, possui 38 classes de vegetação, das quais, foram observadas presença de árvores emergentes em 22 delas. Foi feita uma eliminação das classes onde o número de árvores não foi representativo ($n \leq 6$), restando por fim 13 classes para as análises estatísticas. O número de árvores presentes em cada classe foi calculado e expresso em porcentagem (FIG. 14).

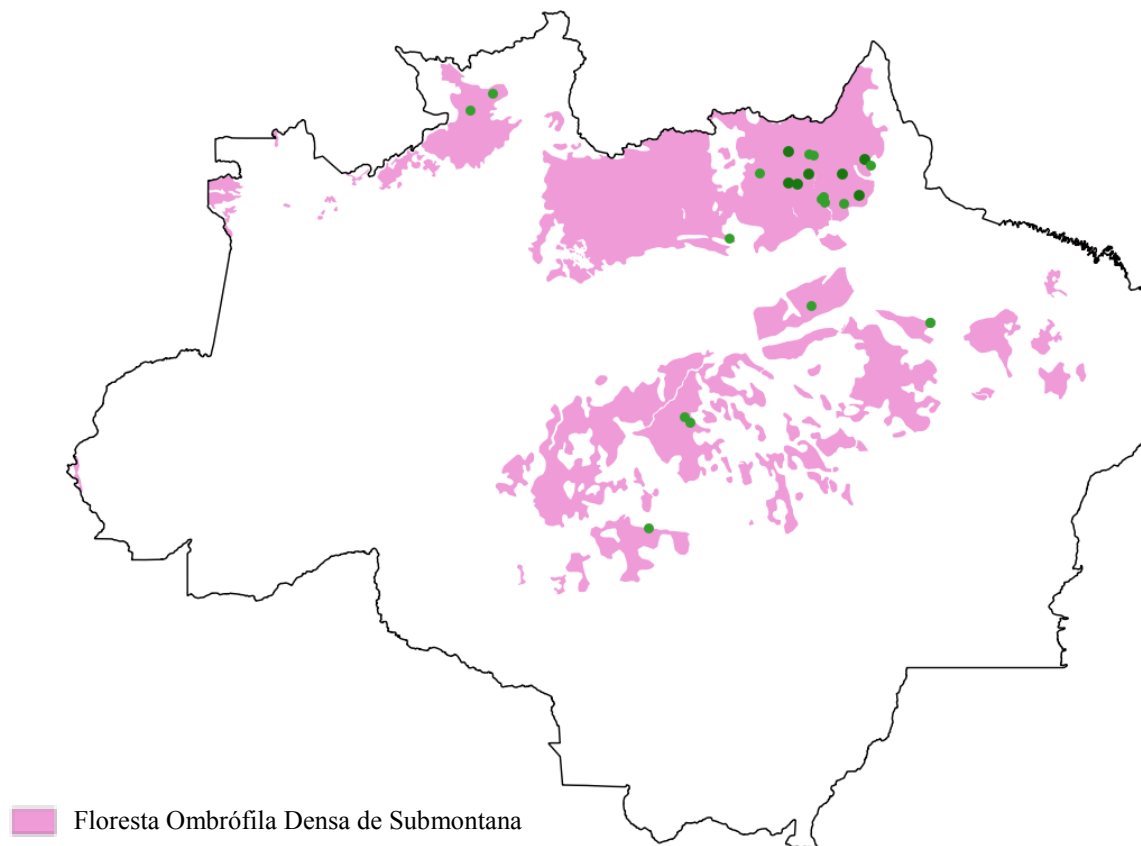
Figura 14 – Mapa de Vegetação da Amazônia Legal e % de árvores emergentes das seis classes com maior %



Fonte: IBGE, 2004.

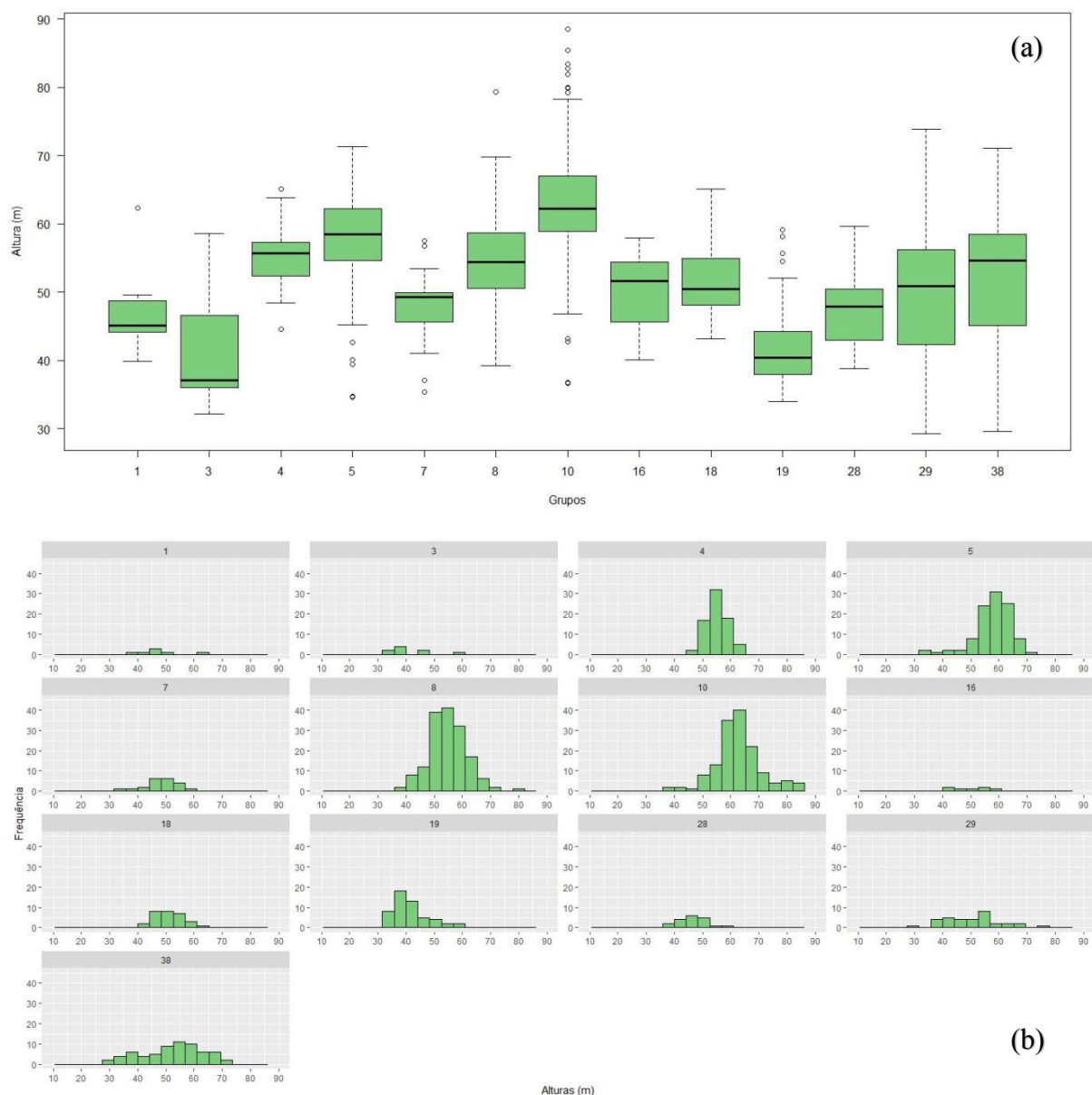
Cerca de 45% das árvores emergentes estão localizadas em Florestas Ombrófilas Densas enquanto aproximadamente 25% encontram-se em Vegetações Ombrófilas Abertas. Juntos, esses dois tipos de cobertura de solo representam 70% da localização das árvores. As demais árvores encontram-se espalhadas em áreas de vegetação secundária e mosaicos agrários, e transições florestais entre savana ou campinarana e floresta ombrófila ou estacional. A árvore mais alta, bem como 79% das árvores acima de 70 m, está localizada em Florestas Ombrófilas Densas de Submontana – FODS (FIG. 15).

Figura 15 – Distribuição das árvores emergentes acima de 70m de altura



Fonte: autora.

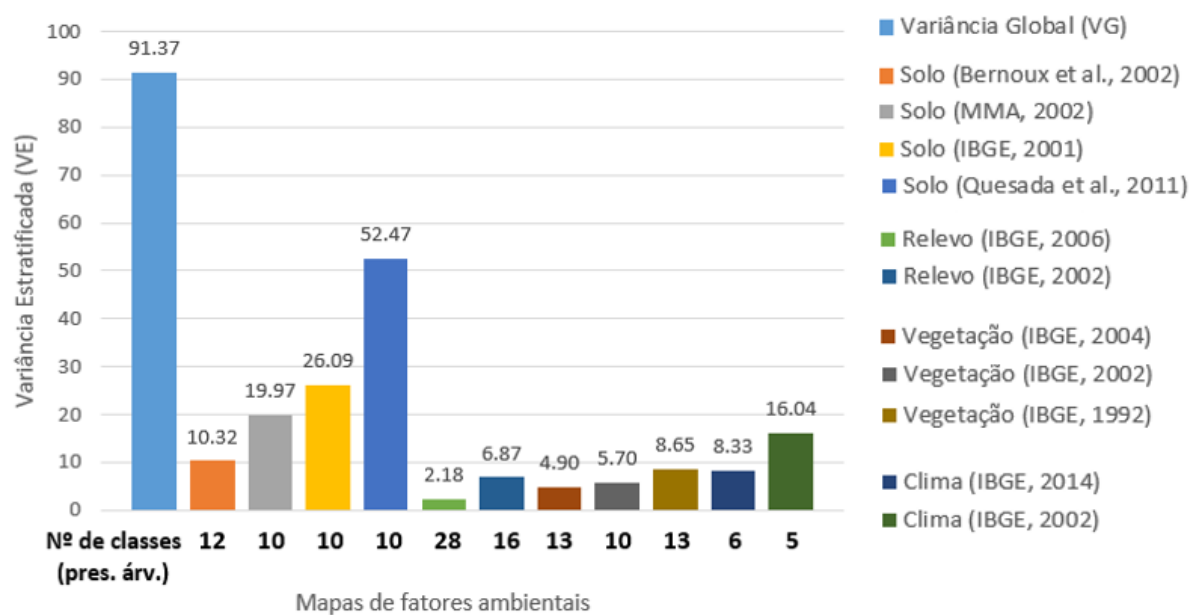
Nas áreas de atividades agrárias a mediana da altura foi cerca de 60% menor do que nas FODS. Metade das árvores localizadas na classe de Vegetação Ombrófila Aberta Submontana (VOAS) tem entre 50 e 60 metros de altura, enquanto cerca de 40% dos indivíduos encontra-se na faixa dos 60-70 metros de altura. Segundo o teste de Dunn, as classes FODS e VOAS foram estatisticamente diferentes de todas as demais classes. As áreas de transição entre Savana e Floresta Ombrófila, bem como as classes de Vegetação Secundária e Atividades Agrárias, possuem alturas bastante heterogêneas, englobando árvores de 30m a 70m. A classe com o menor valor de mediana de altura foi a de mosaico agrário (FIG. 16).

Figura 16 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de vegetação

Fonte: autora. Classes de vegetação: (1) Massa d'água; (3) Atividades Agrárias; (4) Vegetação Ombrófila Aberta Terras Baixas; (5) Vegetação Ombrófila Aberta Submontana; (7) Floresta Ombrófila Densa Aluvial; (8) Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas; (10) Floresta Ombrófila Densa Submontana; (16) Campinarana Florestada; (18) Campinarana/Floresta Ombrófila; (19) Floresta Ombrófila/Floresta Estacional; (28) Savana/ Floresta Estacional; (29) Savana/Floresta Ombrófila; (38) Vegetação Secundária e Atividades Agrárias.

Foi feita a análise de VG e VE das alturas máximas por mapa de fator ambiental. Uma variância mais próxima de zero significa que a variabilidade da altura máxima nesse mapa é mais homogênea e uma variância mais alta significa maior heterogeneidade na distribuição das alturas máximas. Em toda a Amazônia brasileira, as alturas máximas mostraram-se mais homogêneas quando foram agrupadas levando-se em consideração a variável ambiental relevo no mapa do IBGE de 2006, e menos homogêneas quando agrupadas segundo o tipo de solo no mapa produzido por Quesada e colaboradores em 2011 (FIG. 17).

Figura 17 – Variância global da altura e variação estratificada dos mapas de fatores ambientais



Fonte: autora.

Os resultados das análises de variância mostram que os mapas de fatores ambientais com menos classes, ou estratos, apresentam maior VE do que aqueles com mais classes. Levando em consideração as análises de variância nos mapas dos fatores ambientais, também podemos observar uma tendência de maior VE nos mapas de solos do que nos mapas de relevo (ou geomorfologia), além de uma semelhança entre os mapas de vegetação e de relevo.

5 DISCUSSÃO

As árvores mais altas, localizadas na região central e leste da Amazônia, coincidem com áreas de alta biomassa acima do solo (SAATCHI *et al.*, 2007) e alta área basal (MALHI *et al.*, 2006). Nessas regiões os solos são mais pobres e a taxa de rotação das árvores, ou *turnover*, é baixa, favorecendo às espécies de crescimento lento (QUESADA *et al.*, 2011). A maior árvore reportada na Amazônia encontra-se na região do Amapá e alcança 88 metros de altura (GORGENS *et al.*, 2019). Já os solos ricos do sul e oeste da Amazônia, onde foram localizadas maior concentração de árvores com menores alturas, abrigam espécies de rápido crescimento e alta taxa de *turnover* que acabam não alcançando tamanhos elevados (PHILLIPS *et al.*, 2004; QUESADA *et al.*, 2011).

Existe uma relação de interdependência entre a floresta e o solo. Assim como o solo serve de substrato para as plantas, garantindo-lhe a fixação dos nutrientes para o seu crescimento, ele também depende da vegetação para garantir a qualidade de suas propriedades físicas, químicas e biológicas (HIGUCHI; HIGUCHI, 2012, p. 101). O mapa dos estoques de carbono do solo (BERNOUX *et al.*, 2002) apresentou menor variância estratificada da altura em relação ao mapa de solos (QUESADA *et al.*, 2011). Enquanto o mapa de estoque de carbono (BERNOUX *et al.*, 2002) levou em consideração o mapa de solos da EMBRAPA, o mapa de solos (QUESADA *et al.*, 2011) considerou o banco de dados do SOTERLAC. Com relação aos mapas de solo do IBGE (2001) e do MMA (2002) que utilizaram apenas dados de solo, a variância estratificada da altura foi menor no segundo, onde os grupos de solos estão classificados até o 2º nível categórico do SiBCS (Subordens). Nesse nível categórico as classes de solo ressaltam propriedades ou características diferenciais que representam variações importantes dentro das classes do 1º nível categórico (Ordem) do SiBCS, o qual estavam separadas as classes de solo no mapa do IBGE.

Os solos predominantes na Amazônia, em ordem decrescente de área ocupada, são os Latossolos, Argissolos, Plintossolos e Espodossolos, predominando o caráter distrófico (JÚNIOR *et al.*, 2011). Cerca de 80% das árvores emergentes estão localizadas em Latossolos e Argissolos. Apesar de serem quimicamente pobres e ácidos, os Latossolos têm condições físicas bem desenvolvidas. São solos em avançado estágio de intemperização, e em geral são muito profundos, porosos e bem drenados. Comparados aos Latossolos, os Argissolos são menos intemperizados e ocorrem em topografias mais acidentadas (IBGE, 2007). Todas as árvores que ultrapassaram os 70 metros de altura estão localizadas nesses dois tipos de solo, predominantemente de textura argilosa. Um estudo anterior mostrou que o aumento do teor de

argila no solo favorece o crescimento em altura das árvores (GORGENS *et al.*, 2020). Em direção ao leste da Amazônia os solos são mais estruturados, o que permite que as árvores tenham um volume adicional de água durante a estação seca (FISHER *et al.*, 2008; HODNETT *et al.*, 1997). Os sistemas radiculares dimórficos, aliados a solos argilosos estruturados, podem redistribuir a água de camadas profundas para a superfície durante períodos de seca (BROEDEL *et al.*, 2017).

Devido a importância da precipitação nos climas tropicais, o mapa de Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal (IBGE, 2014) adotou a variável precipitação para definir os diferentes graus de agressividade nas áreas. Esse acréscimo de informações na camada, referentes aos regimes hídricos da região, propiciou menor variabilidade da altura em relação ao mapa de Clima do Brasil (IBGE, 2002), que reflete a ocorrência e distribuição da precipitação na informação referente ao número de meses secos no ano. Árvores mais altas foram encontradas em áreas caracterizadas pelo excesso de umidade durante todo o ano, em maior número, onde o potencial de agressividade é baixo e a precipitação média anual varia entre 1.750 mm a 2.250 mm. Em áreas caracterizadas pelo excesso de umidade, mas onde a precipitação média anual pode ultrapassar 3.000 mm, foram encontradas árvores menores. Árvores mais baixas também estão presentes em áreas caracterizadas pela deficiência de umidade, onde a precipitação média anual varia entre 1250 mm a 2000 mm.

A precipitação média anual é um fator chave no crescimento das árvores, e áreas muito secas ou muito úmidas podem inibir o crescimento de árvores altas (GORGENS *et al.*, 2020). A disponibilidade de água no solo depende da precipitação e da evapotranspiração. Scheffer (2018) aponta que a evapotranspiração acima de 1.500 mm ano⁻¹ pode exceder a precipitação nas florestas tropicais. Isso pode acabar levando a mortalidade de árvores próximas a sua altura máxima devido a falha hidráulica (MCDOWELL *et al.*, 2008). Em áreas com alta precipitação média anual, o excesso de água aliado a solos mal drenados pode resultar em condições anaeróbicas com efeitos negativos no crescimento e sobrevivência das árvores (QUESADA *et al.*, 2009).

No mapa de Unidades de Relevo (IBGE, 2006), onde a variabilidade da altura foi menor, os fatores geomorfológicos são ordenados segundo uma classificação do relevo baseada em ordem de grandeza tempo-espaciais, os Domínios Morfoestruturais. Eles ocorrem em escala regional e organizam os fatos geomorfológicos segundo o arcabouço geológico, marcado pela natureza das rochas e pela tectônica que atua sobre elas. Ao longo do tempo geológico, sob efeitos climáticos variáveis, esses fatores geraram grandes conjuntos de relevo com características próprias, cujas feições, embora diversificadas, guardam entre si relações comuns

com a estrutura geológica da qual se originaram (IBGE, 1995). Já no mapa dos Compartimentos de Relevo (IBGE, 2002), o conjunto de formas de relevo que compõem as unidades constituem compartimentos baseado em feições genéricas de relevo (planícies, depressões, tabuleiros, chapadas, patamares, planaltos e serras).

Árvores mais altas foram localizadas em áreas formadas por escudos cristalinos, caracterizadas, em geral, pela sua estabilidade e composição antiga, enquanto árvores mais baixas foram encontradas em depósitos e bacias sedimentares. As variações e tipos de material de origem estão correlacionadas com as propriedades físicas e químicas dos solos na Bacia Amazônica, exibindo um gradiente de idade Leste-Oeste (QUESADA *et al.*, 2011). Essa variação no solo entre formações geológicas influencia fortemente nos padrões florísticos, estruturais e demográficos da Amazônia (ter STEEGE *et al.*, 2006; QUESADA *et al.* 2012). A variação na composição da comunidade arbórea pode ser explicada por dois gradientes principais: um se estende do Escudo da Guiana ao sudoeste da Amazônia e o outro da Colômbia para o sudoeste da Amazônia. O primeiro gradiente segue a variação na fertilidade do solo e seus efeitos na densidade da madeira das árvores e na massa de sementes, e o segundo está ligado à duração da estação seca (ter STEEGE *et al.*, 2006).

Em todos os mapas de vegetação do IBGE analisados, as árvores emergentes foram localizadas, predominantemente, nas mesmas classes de formações florestais. As regiões fitoecológicas, ou tipos de vegetação, passaram por revisões quanto a delineamentos e conceitos ao longo das atualizações dos mapas, propiciando assim essa menor variabilidade das alturas por classe à medida que novos mapas foram sendo elaborados, com menor variabilidade presente no mapa de vegetação do IBGE mais recente analisado, de 2004.

As árvores mais altas estão localizadas em uma formação florestal que recebe o nome de Floresta Ombrófila Densa Submontana. Esta formação é composta principalmente por fanerófitos de alto porte, alguns ultrapassando 50 m na Amazônia e raramente 30 m nas outras partes do País. As espécies presentes nesta formação variam de acordo com a latitude, ressaltando-se a importância do fator tempo nesta variação ambiental (IBGE, 2012). Nas florestas do Oeste amazônico há maior homogeneidade quanto às famílias, com destaque para as *Myristicaceae*, *Arecaceae* e *Moraceae* (PITMAN *et al.*, 2001; CONDIT 2002), enquanto no Leste os padrões de composição em nível de família são diferentes, com predominância das *Sapotaceae*, *Chrysobalanaceae*, *Fabaceae* e *Lecythidaceae* (CHAVE *et al.*, 2006).

As espécies das árvores emergentes podem ser diretamente afetadas pelo aumento da frequência de secas severas. Em escala global, foram documentadas taxas mais altas de mortalidade em florestas tropicais entre as grandes árvores, potencialmente recorrentes pelo

fato destas árvores apresentarem maior vulnerabilidade fisiológica ao estresse hídrico (BENNETT *et al.*, 2015). Por ultrapassarem o dossel da floresta, as copas das árvores mais altas ficam expostas a elevadas radiações solares e ao déficit de pressão de vapor, tornando as condições mais difíceis para manter o balanço positivo de carbono, uma vez que as demandas evaporativas aumentam sob reduzida disponibilidade de água. Além disso, existe uma estreita relação entre o tamanho da árvore, a profundidade do enraizamento e o risco de embolia, de modo que a maioria das árvores emergentes trabalham no limite da segurança hidráulica, justificando assim suas maiores taxas de mortalidade em eventos de seca extrema (BRUM *et al.*, 2019). O fato das grandes árvores apresentarem taxas de crescimento reduzidas durante as secas (BENNETT *et al.*, 2015) é consistente com a previsão de menor produtividade florestal, em termos de produção de madeira, em florestas tropicais que experimentam condições mais secas e quentes e/ou secas severas (BRANDO *et al.*, 2008).

Embora as árvores muito grandes geralmente representam uma pequena fração da abundância geral de árvores, elas respondem pela maior parte de biomassa da floresta, contribuindo assim com a maior parte dos efeitos nos ciclos biogeoquímicos e processos do ecossistema, como armazenamento de carbono, ciclagem de água e dinâmica de nutrientes. Dessa forma, as grandes árvores são desproporcionalmente responsáveis pela maior parte dos benefícios diretos e indiretos fornecidos pelas florestas tropicais (LUTZ *et al.*, 2018).

Além das adaptações necessárias à cada espécie que compõe o estrato emergente da floresta amazônica, as condições ambientais influenciam os indivíduos que atingem sua altura máxima. Ainda que uma miríade de dados relativos aos fatores ambientais para o bioma amazônico, dentre outros, esteja disponível, o grande desafio é compreender como esses fatores, combinada ou isoladamente, afetam a distribuição dos indivíduos de alturas máximas na Amazônia brasileira.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Além de apoiar a biodiversidade, árvores emergentes que conseguem atingir alturas elevadas são responsáveis por uma grande quantidade do fluxo de água transpirado e pelo estoque de carbono acima do solo presente na floresta, desempenhando, portanto, importantes funções ecossistêmicas, tais como a regulação do ciclo da água e a regulação climática (CLEMENT; HIGUCHI, 2006; NOBRE *et al.*, 2007). As espécies de grandes árvores estão intrinsecamente ligadas aos principais serviços do ecossistema que as florestas tropicais fornecem em escalas locais a globais, seja para o bem-estar humano ou para atividades econômicas. Uma vez que as grandes árvores podem chegar a centenas de anos de idade, elas aumentam seu valor a longo prazo e os benefícios ecológicos que proporcionam.

Às árvores emergentes tropicais também desempenham um importante papel no cenário das tendências e mudanças globais. Ameaças a estas árvores devem ser levadas em consideração e incorporadas nas agendas globais. Ao subestimar as múltiplas contribuições oferecidas pelas grandes árvores tropicais e suas necessidades, corremos o risco não apenas do desaparecimento desse patrimônio biológico, mas também da perda de oportunidade de desenvolver regiões de floresta tropical de forma sustentável.

É de fundamental importância compreender como as alturas máximas se distribuem espacialmente nas florestas tropicais e como essa distribuição está associada às condições ambientais e às características funcionais das árvores. Este trabalho demonstrou que, em toda a Amazônia Brasileira, a altura máxima apresentou menor variância quando estratificada pela variável ambiental relevo, e maior variância quando estratificada pelo tipo de solo. Uma vez que a influência dos fatores ambientais no crescimento das árvores não ocorre de forma isolada, sugere-se que, em trabalhos futuros, seja analisada a relação entre fatores, bem como a consideração de outros fatores não considerados neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C.T. de.; GALVÃO, L. S.; ARAGÃO, L. E. D. C.; OMETTO, J. P. H. B.; JACONA, A. D.; PEREIRA, F. R. S.; SATO, L. Y.; LOPES, A. P.; GRAÇA, P. M. L. A.; SILVA, C. V. J.; FERREIRA-FERREIRA, J.; LONGO, M. Combining LiDAR and hyperspectral data for aboveground biomass modeling in the Brazilian Amazon using different regression algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 232, 2019.
- BERNOUX, M.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's Soil Carbon Stocks. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 3, p. 888–896, 2002.
- BENNETT, A.C., MCDOWELL, N.G., ALLEN, C.D. & ANDERSON-TEIXEIRA, K.J. Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. **Nature Plants**, v. 1, 2015.
- BRANDO, P. M.; NEPSTAS, D. C.; DAVIDSON, E. A.; TRUMBORE, S. E.; RAY D.; CAMARGO, P. Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: Results of a throughfall reduction experimente. **The Royal Socciety**, v. 363, p. 1839-1848, 2008.
- BROEDEL, E.; TOMASELLA, J.; CÂNDIDO, L. A.; RANDOW, C. VON. Deep soil water dynamics in an undisturbed primary forest in central Amazonia: Differences between normal years and the 2005 drought. **Hydrological Processes**, v. 31, p. 1749–1759, 2017.
- BRUM, M.; VADEBONCOEUR, M. A.; IVANOV, V.; ASBJORNSEN, H.; SALESKA, S.; ALVES, L. F.; PENHA, D.; DIAS, J. D.; ARAGÃO, L. E. O. C.; BARROS, F.; BITTENCOURT, P.; PEREIRA, L.; OLIVEIRA, R. S. Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon forest. **Journal of Ecology**, v. 107, p. 318-333, 2019.
- CAMPOS, J. C. C. Principais fatores do meio que afetam o crescimento das árvores. **Revista Floresta**, n. 3, p. 45 – 52, 1970.
- CHAVE, J.; MULLER-LANDAU, H.C.; BAKER, T.R.; EASDALE, T.A.; STEEGE, H.TER; WEBB, C.O. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. **Ecological applications**, v. 16, p. 2356–2367, 2006.
- CHAVE, J.; PIPONIOT, C.; MARÉCHAUX, I.; DE, F.H.; LARPIN, D.; FISCHER, F.J.; DERROIRE, G.; VINCENT, G.; HÉRAULT, B. Slow rate of secondary forest carbon accumulation in the Guianas compared with the rest of the Neotropics. **Ecological Applications**, v. 30, e02004, 2020.
- CLEMENT, C. R.; HIGUCHI, N. A floresta Amazônica e o futuro do Brasil. **Ciência e Cultura**, v. 58, n. 3, p. 44–49, 2006.
- CONDIT, R. Beta-Diversity in Tropical Forest Trees. **Science**, v. 295, p. 666–669, 2002.
- COOMES, D.A.; JENKINS, K.L. & COLE, L.E.S. Scaling of tree vascular transport systems along gradients of nutrient supply and altitude. **Biology Letters**, v. 3, p. 87–90, 2006.

COOPS, N. C.; HILKER, T.; WULDER, M. A.; ST-ONDE, B.; NEWNHAM, G.; SIGGINS, A.; TROFYMOW, J. A. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete return LiDAR. **Trees**, v. 21, n. 3, p. 295–310, 2007.

DIJKSHOORN, J. A.; HUTING, J. R. M.; TEMPEL, P.: Update of the 1:5 million Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC; version 2.0), Report 2005/01, **ISRIC – World Soil Information**, Wageningen, 2005.

DUBAYAH, R.; KNOX, R.; HOFTON, M.; BLAIR, J.; DRAKE, L. Land surface characterization using LiDAR remote sensing, 2000.

DUNN, O. J. Multiple Comparisons Using Rank Sums. **Technometrics**, v. 6, n. 3, p. 241–252, 1964. ISSN 0040-1706. doi:10.1080/00401706.1964.10490181.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa de Solos do Brasil**, escala 1:5 000 000. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro, 1981.

FALKOWSKI, P.; SCHOLES, R. J.; BOYLE, E.; CANADELL, J.; CANFIELD, D.; ELSER, J.; GRUBER, N.; HIBBARD, K.; HOGBERG, P.; LINDER, S.; MACKENZIE, F. T.; MOORE III, B.; PEDERSEN, T.; ROSENTHAL, Y.; SEITZINGER, S.; SMETACEK, V.; STEFFEN, W. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. **Science**, v. 290, n. 5490, p.291–296, 2000.

FISHER, R. A.; WILLIAMS, M.; LOURDES RUIVO, M. DE; COSTA, A. L. DE & MEIR, P. Evaluating climatic and soil water controls on evapotranspiration at two Amazonian rainforest sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 850–861, 2008.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231–244, 2010.

GORGENS, E.B.; DA SILVA, A. G. P.; RODRIGUEZ, L. C. E. **LiDAR: Aplicações florestais**. Viçosa, MG : Ed. CRV, 2014. 132 p. ISBN:978-85-444-0105-7.

GÖRGENS, E.B.; SOARES, C.P.B.; NUNES, M.H. & RODRIGUEZ, L.C.E. Characterization of Brazilian forest types utilizing canopy height profiles derived from airborne laser scanning. **Applied Vegetation Science**, v. 19, p. 518–527, 2016.

GORGENS, E.B.; MOTTA, A.Z.; ASSIS, M.; NUNES, M.H.; JACKSON, T.; COOMES, D.; ROSETTE, J.; ARAGÃO, L. E. O. e C.; OMETTO, J. P. The giant trees of the Amazon basin. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 17, p. 373–374, 2019.

GORGENS, E. B.; NUNES, M. H.; JACKSON, T.; COOMES, D.; KELLER, M.; REIS, C. R.; VALBUENA, R.; ROSETTE, J.; ALMEIDA, D. R. A.; GIMENEZ, B.; CANTINHO, R.; MOTTA, A. Z.; ASSIS, M.; PEREIRA, F. R. S.; SPANNER, G.; HIGUCHI, N.; OMETTO, J. P. Resource availability and disturbance shape maximum tree height across the Amazon. **Global Change Biology**, 2020.

HABIB, A. F.; KERSTING, A. P.; RUIFANG, Z.; AL-DURGHAM, M.; KIM, C.; LEE, D. C. LiDAR strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37, p. 385–390, 2008.

HIGUCHI, M. I. G. & HIGUCHI, N. **A floresta amazônica e suas múltiplas dimensões: Uma proposta de educação ambiental**. – 2. ed. ver. e ampl. Manaus: [s.n], 2012. 424p.

HODNETT, M. G.; VENDRAME, I.; MARQUES FILHO, A. D. O.; OYAMA, M. D.; TOMASELLA, J. Soil water storage and groundwater behaviour in a catenary sequence beneath forest in central Amazonia: I. Comparisons between plateau, slope and valley floor. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, p. 265–277, 1997.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Vegetação do Brasil**, escala 1: 250 000. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 1922. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 15 abr. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Vegetação do Brasil**, escala 1:5 000 000. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 1988. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=66105&view=detalhes>>. Acesso em: 15 abr. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Unidades do Relevo do Brasil**, escala 1:5 000 000. Rio de Janeiro, 1993. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=66109>>. Acesso em: 14 fev. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de geomorfologia**. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – Rio de Janeiro : IBGE, 1995. 113 p. – (Manuais técnicos em Geociências, 0103-9598; n 5)

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 25 jun. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Vegetação do Brasil**, escala 1: 250.000. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 15 abr. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Compartimentos do Relevo do Brasil**, escala 1: 250 000. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia/10870-geomorfologia.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Biomas do Brasil** – primeira aproximação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/15842-biomas.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 3 jun. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Vegetação do Brasil**, escala 1: 5 000 000. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/10872-vegetacao.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 18 maio 2020.

IBGE lança o Mapa de Biomas do Brasil e o Mapa de Vegetação do Brasil, em comemoração ao Dia Mundial da Biodiversidade. **Agência IBGE notícias**, 2004. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/12789-asi-ibge-lanca-o-mapa-de-biomas-do-brasil-e-o-mapa-de-vegetacao-do-brasil-em-comemoracao-ao-dia-mundial-da-biodiversidade>>. Acesso em: 10 maio 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Unidades do Relevo do Brasil**, escala 1: 5 000 000. Diretoria de Geociências (IBGE/DGC) e Embrapa – Solos, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia/15827-unidades-de-relevo.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 15 fev. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. ed. – Rio de Janeiro: IBGE, 2007. (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598, n. 4).

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Geomorfologia**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182p. – (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598; n. 5).

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. – 2. ed. rev. e ampl. – Rio de Janeiro, Brasil. 2012.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal**, escala 1: 5 000 000. Diretoria de Geociências (IBGE/CREN), Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/15817-clima.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 20 maio 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa da Amazônia Legal**. Diretoria de Geociências – Coordenação de Geografia. 2014. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15819-amazonia-legal.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

INPE. **Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite**, 2016. <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>>. Acesso em: 27 jan. 2020.

INPE. **TerraClass**, 2014. Disponível em: <http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/dados_terraclass.php>. Acesso em: 27 jan. 2020.

IPCC/UNEP/OECD/IEA. **Revised 1996 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories**: Reporting Instructions (Vol. 1); Workbook (Vol. 2); Reference Manual (Vol. 3). Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency, Paris, 1997 Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>>. Acesso em: 12 jun. 2020.

IUSS (International Union of Soil Science) Working Group WRB: World reference base for soil resources 2006: A framework for international classification, correlation and communication, World Soil Resources Report 103, FAO, Rome, 2006.

JÚNIOR, J. F. V.; SOUZA, M. I. L.; NASCIMENTO, P. P. R. R.; CRUZ, D. L. S. Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 5, n. 2, p. 158–165, 2011.

KOCH, G. W.; SILLETT, S. C.; JENNINGS, G. M & DAVIS, S. D. The limits to tree height. **Nature**, v. 428, p. 851–854, 2004.

KRAUS, K.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing**, Elsevier, v. 53, p. 193–203, 1988.

KRUSKAL, W. H. & WALLIS, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis, **Journal of the American Statistical Association**, v. 47:260, p. 583–621, 1952.

LONGO, M.; KELLER, M.; DOS-SANTOS, M. N.; LEITOLD, V.; PINAGÉ, E. R.; BACCINI, A.; SAATCHI, S.; NOGUEIRA, E. M.; BATISTELLA, M.; MORTON, D. C. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. **Global Biogeochem Cycles**, v. 30, p. 1639–1660, doi:10.1002/2016GB005465, 2016.

LUTZ, J. A.; FURNISS, T. J.; JOHNSON, D. J.; DAVIES, S. J.; ALLEN, D.; ALONSO, A.; ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; ANDRADE, A.; BALTZER, J.; BECKER, K. M. L.; et al. Global importance of large-diameter trees. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, p. 849–864, 2018.

MALHI, Y.; WOOD, D.; BAKER, T.R.; WRIGHT, J.; PHILLIPS, O.L.; COCHRANE, T.; MEIR, P.; CHAVE, J.; ALMEIDA, S.; ARROYO, L.; HIGUCHI, N.; KILLEEN, Y. J.; LAURANCE, S. G.; LAURANCE, W. F.; LEWIS, S. L.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; VARGAS, P. N.; PITMAN, N. C. A.; QUESADA, C. A.; SALOMÃO, R.; SILVA, J. S. N.; LEZAMA, A. T.; TERBORGH, J.; MARTÍNEZ, R. V.; VINCETI, B. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 12, p. 1107–1138, 2006.

MARVIN, D. C.; ASNER, G. P.; KNAPP, D. E.; ANDERSON, C. B.; MARTIN, R. E.; SINCA, F.; TUPAYACHI R. Amazonian landscapes and the bias in field studies of forest structure and biomass. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 111, E5224–E5232, 2014.

MCDOWELL, N.; POCKMAN, W. T.; ALLEN, C. D.; BRESHEARS, D. D.; COBB, N.; KOLB, T.; PLAUT, J.; SPERRY, J.; WEST, A.; WILLIAMS, D. G.; YEPEZ, E. A.

Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. **New Phytologist**, v. 178, p. 719–739, 2008.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Programa zoneamento ecológico econômico**. 2006a. Disponível em:

<<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/mma/openlayers.htm?phn2u774j65fvqo00colapl0s1>>.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Mapa da Amazônia Legal**, escala 1: 250 000. Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em:

<<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Amazônia**, c2020. Biomas. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/biomas/amaz%C3%B4nia>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

MME, Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL, programa de integração nacional. **Levantamento de Recursos Naturais**, v. 1–38. Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro, 1973-1983.

NÆSSET, E. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 2, p. 246–253, 1997.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n.3, p. 22–27, 2007.

OMETTO, J.P; AGUIAR, A.P; ASSIS, T.; SOLER, L.; VALLE, P.; TEJADA, G.; LAPOLA, D.M.; MEIR, P. Amazon forest biomass density maps: tackling the uncertainty in carbon emission estimates. **Climate Change**, v. 124, p. 545–560. 2014.

PHILLIPS, O.L., BAKER, T.R., ARROYO, L., HIGUCHI, N., KILLEEN, T.J., LAURANCE, W.F., LEWIS S. L.; LLOYD, J.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; VARGAS, P. N.; SILVA, J. N. M.; TERBORGH, J.; MARTÍNEZ, R. V.; ALEXIADES, M.; ALMEIDA, S.; BROWN, S.; CHAVE, J.; COMISKEY, J. A.; CZIMCZIK, C. I.; FIORE A. D.; ERWIN, T.; KUEBLER, C.; LAURANCE, S. J.; NASCIMENTO, H. E. M.; OLIVER, J.; PALACIOS, W.; PATINÕ, S.; PITMAN, N. C. A.; QUESADA, C. A.; SALDIAS, M.; LEZAMA, A. T.; VINCETI, B. Pattern and process in Amazon tree turnover, 1976–2001. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, v. 359, p. 381–407, 2004.

PITMAN, N.C.A., TERBORGH, J.W., SILMAN, M.R., NÚÑEZ V, P., NEILL, D.A., CERÓN, C.E., PALACIOS, W. A.; AULESTIA, M. Dominance and distribution of tree species in upper Amazonian terra firme forests. **Ecology**, v. 82, p. 2101–2117, 2001.

POPESCU, S.C.; WYNNE, R; NELSON, R.F. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 37, p. 71–95, 2002.

QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2017. **QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation**. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>> 2017.

QUESADA, C.A.; LLOYD, J.; SCHWARZ, M.; BAKER, T.R.; PHILLIPS, O.L.; PATIÑO, S.; CZIMCZIK, C.; HODNETT, M. G.; HERRERA, R.; ARNETH, A.; LLOYD, G.; MALHI, Y.; DEZZEO, N.; LUIZÃO, F. J.; SANTOS, A. J. B.; SCHMERLER, J.; ARROYO, L.; SILVEIRA, M.; PRIANTE FILHO, N.; JIMENEZ, E. M.; PAIVA, R.; VIEIRA, I.; NEILL, D. A.; SILVA, N.; PEÑUELA, M. C.; MONTEAGUDO, A.; VÁSQUEZ, R.; PRIETO, A.; RUDAS, A.; ALMEIDA, S.; HIGUCHI, N.; LEZAMA, A. T.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, G.; PEACOCK, J.; FYLLAS, N. M.; ALVAREZ DÁVILA, E.; ERWIN, T.; DI FIORE, A.; CHAO, K. J.; HONORIO, E.; KILLEEN, T.; PEÑA CRUZ, A.; PITMAN, N.; NÚÑEZ VARGAS, P.; SALOMÃO, R.; TERBORGH, J.; RAMÍREZ, H. Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties. **Biogeosciences Discussion**, v. 6, p. 3993–4057, 2009.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; ANDERSON, L. O.; FYLLAS, N. M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C. I. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, v. 8, n. 6, p. 1415–1440, 2011.

QUESADA, C. A.; PHILLIPS, O. L.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C. I.; BAKER, T. R.; PATIÑO, S.; FYLLAS, N. M.; HODNETT, M. G.; HERRERA, R.; ALMEIDA, S.; ALVAREZ DÁVILA, E.; ARNETH, A.; ARROYO, L.; CHAO, K. J.; DEZZEO, N.; ERWIN, T.; DI FIORE, A.; HIGUCHI, N.; HONORIO CORONADO, E.; JIMENEZ, E. M.; KILLEEN, T.; LEZAMA, A. T.; LLOYD, G.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, G.; LUIZÃO, F. J.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; NÚÑEZ VARGAS, P.; PAIVA, R.; PEACOCK, J.; PEÑUELA, M. C.; PEÑA CRUZ, A.; PITMAN, N.; PRIANTE FILHO, N.; PRIETO, A.; RAMÍREZ, H.; RUDAS, A.; SALOMÃO, R.; SANTOS, A. J. B.; SCHMERLER, J.; SILVA, N.; SILVEIRA, M.; VÁSQUEZ, R.; VIEIRA, I.; TERBORGH, J.; LLOYD, J. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. **Biogeosciences**, v. 9, n. 6, p. 2203–2246, 2012.

REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J.; ANDERSEN, H-E. & CARSON, W. W. Accuracy of a high-resolution LiDAR terrain model under a conifer forest canopy. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 527–535, 2003.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://cran.r-project.org>>. 2017.

SAATCHI, S. S.; HOUGHTON, R. A.; DOS SANTOS ALVALÁ, R.C.; SOARES, J.V.; YU, Y. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. **Global Change Biology**, v. 13, p. 816–837, 2007.

SAATCHI S. S.; STEINENGER, M.; TUCKER, C. J.; NELSON, B.; AND SIMARD, M.: 1km Land Cover and Wetlands Maps of the Amazon Basin. Data set available from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A., 2008.

SCHEFFER, M.; XU, C.; HANTSON, S.; HOLMGREN, M.; LOS, S. O.; NES, E. H. van. A global climate niche for giant trees. **Global Change Biology**, v. 24, p. 2875–2883, 2018.

SEEG, Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil: 1970 a 2018**. Observatório do Clima, 2019.

SHAPIRO, SS; WILK, MB. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika** . 52 (3-4): 591-611. doi : 10.1093 / Biomet / 52,3-4,591 . JSTOR 2.333.709 . MR 0.205.384 .p. 593, 1965.

SILVA, R. P. da.; NAKAMURA, S.; de AZEVEDO, C. P.; CHAMBERS, J.; ROCHA, R. M.; PINTO, A. C. M.; dos SANTOS, J. e HIGUCHI, N. Uso de banda dendrométrica na definição de padrões de crescimento individual em diâmetro de árvores da bacia do rio cuieiras. **Acta Amazônica**, v. 33, n. 1, p. 67–84, 2003.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. 2. ed. – Viçosa, MG : Ed. UFV, 2011. 272p.

STEEGE, H. TER, PITMAN, N.C.A., PHILLIPS, O.L., CHAVE, J., SABATIER, D., DUQUE, A., *et al.* Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. **Nature**, v. 443, p. 444–447. 2006.

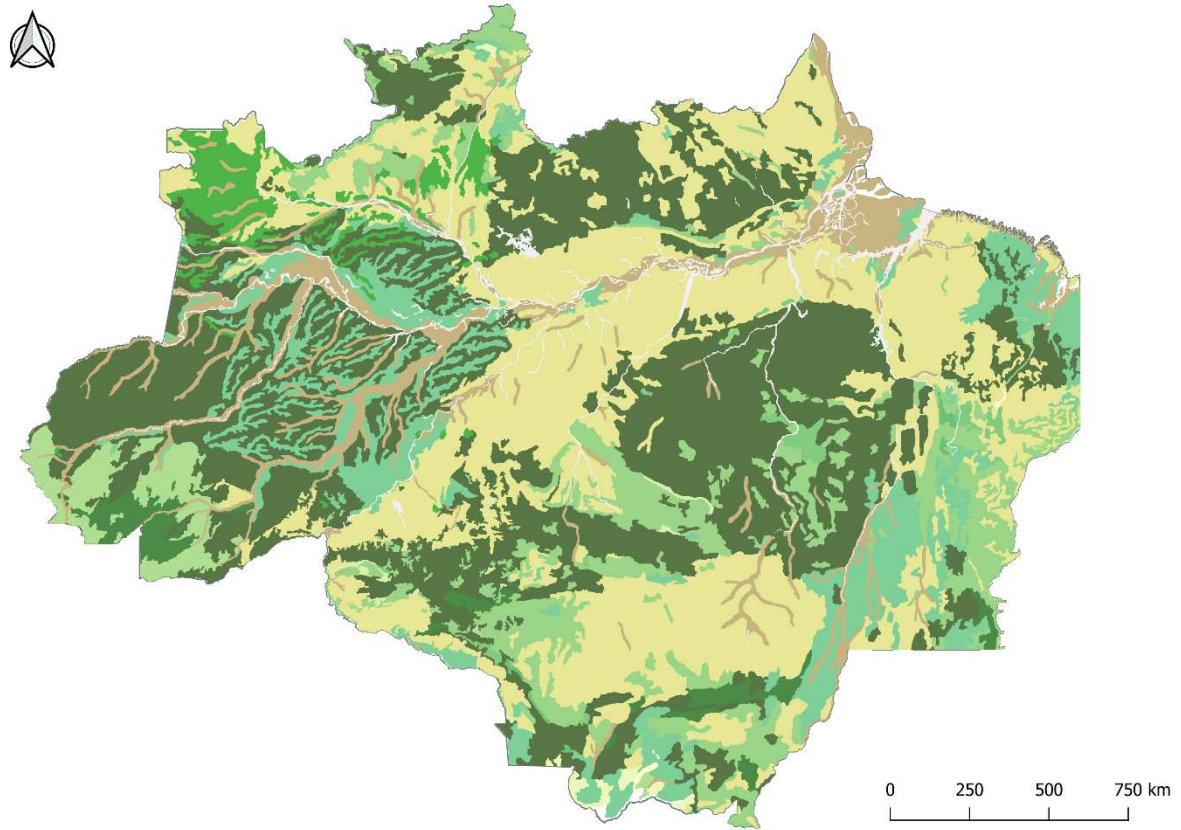
STROPP, J.; UMBELINO, B.; CORREIA, R.A.; CAMPOS-SILVA, J.V.; LADLE, R.J. & MALHADO, A.C.M. The ghosts of forests past and future: deforestation and botanical sampling in the Brazilian Amazon. **Ecography**, v. 43, p. 979–989, 2020.

TEJADA, G.; GÖRGENS, E.B.; ESPÍRITO-SANTO, F.D.B.; CANTINHO, R.Z. & OMETTO, J.P. Evaluating spatial coverage of data on the aboveground biomass in undisturbed forests in the Brazilian Amazon. **Carbon Balance and Management**, v. 14, 2019.

WAGNER, W.; ULLRICH, A.; MELZER, T.; BRIESE, C.; KRAUS, K. From single-pulse to fullwaveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: **ISPRS Congress International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Freiburg. Annals. Freiburg: ISPRS, 2004. p. 201–206.

APÊNDICE A – MAPAS E LEGENDAS DETALHADAS

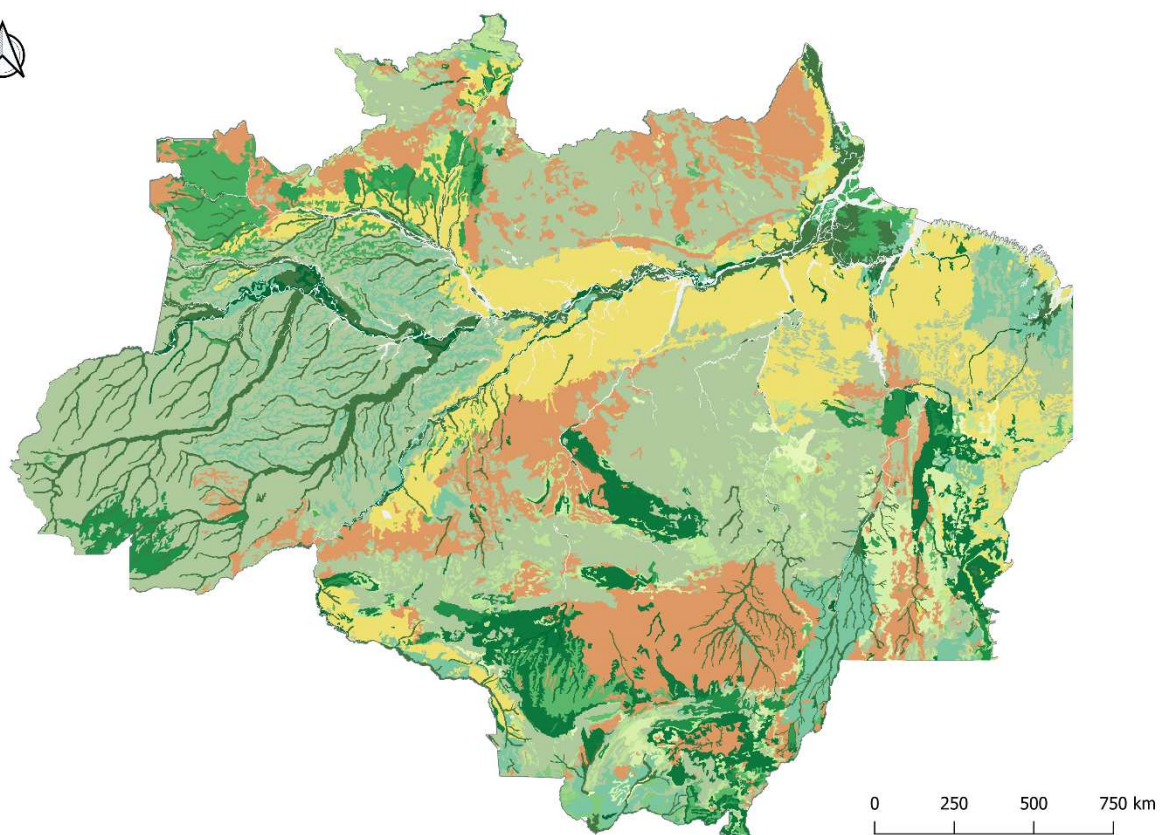
Figura 17 – Mapa de Solos do Brasil (IBGE, 2001)



Classes de solo

Argissolo	Latossolo
Afloramentos de Rochas	Luvissolo
Cambissolo	Massa d'água
Chernossolo	Nitossolo
Espodossolo	Neossolo
Gleissolo	Planossolo
Plintossolo	Vertissolo

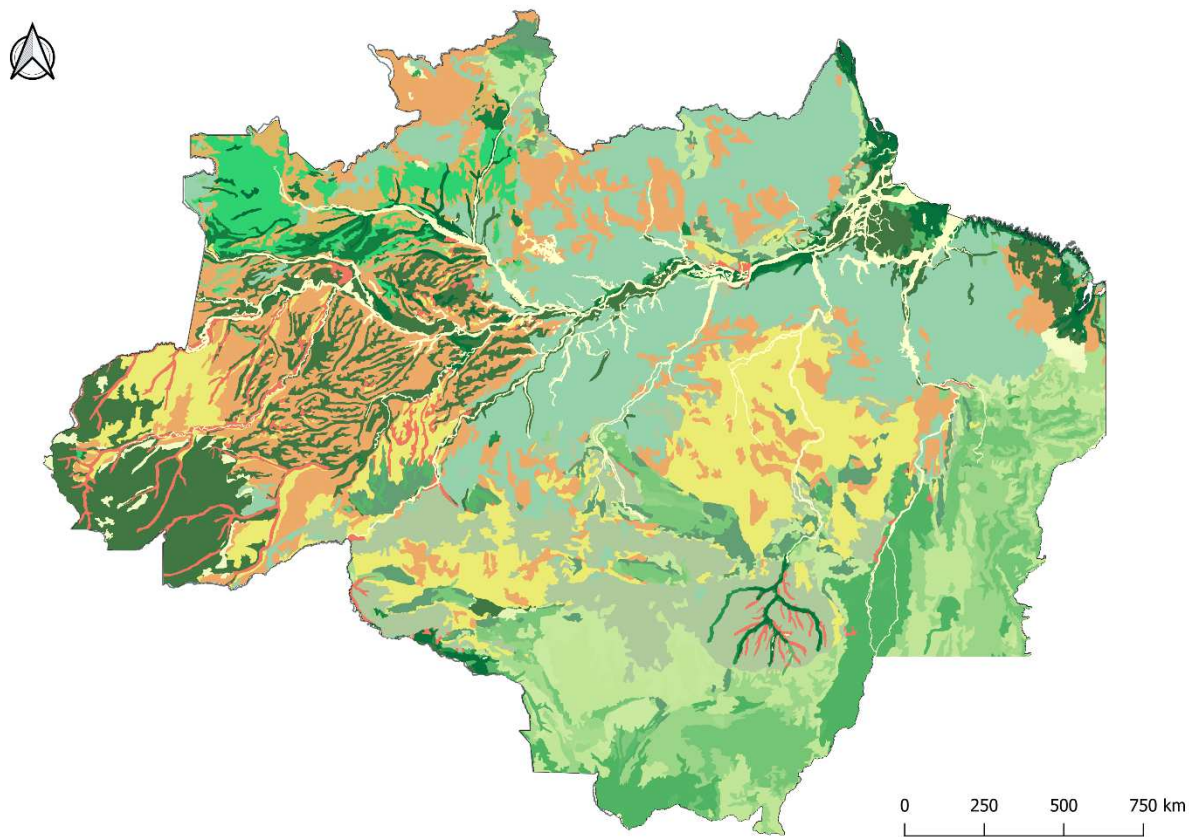
Figura 18 – Mapa de Solos do Brasil (MMA, 2006)



Classes de solo

■ Solos Aluviais	■ Planossolo
■ Areias Quartzosas Marinhas	■ Planossolo Solódico
■ Areias Quartzosas	■ Plintossolo
■ Afloramento de Rochas	■ Plintossolo Solódico
■ Brunizem Avermelhado	■ Podzólico Vermelho-Amarelo
■ Cambissolo	■ Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico
■ Gleissolo	■ Solos Litólicos
■ Areias Quartzosas Hidromórficas	■ Solonchak
■ Hidromórfico Cinzento	■ Solos Indiscriminados de Mangue
■ Solos Hidromórficos Indiscriminados	■ Solos Petroplinticos
■ Podzol Hidromórfico	■ Solonetz Solodizado
■ Latossolo Amarelo	■ Terra Roxa Estruturada
■ Latossolo Vermelho-Escuro	■ Terra Roxa Estruturada Latossólica
■ Latossolo Roxo	■ Vertissolo
■ Latossolo Vermelho-Amarelo	■ Massa de água
■ Podzólico Vermelho-Escuro	

Figura 19 – Mapa de estoques de carbono no solo (BERNOUX *et al.*, 2002)



Classes de solo

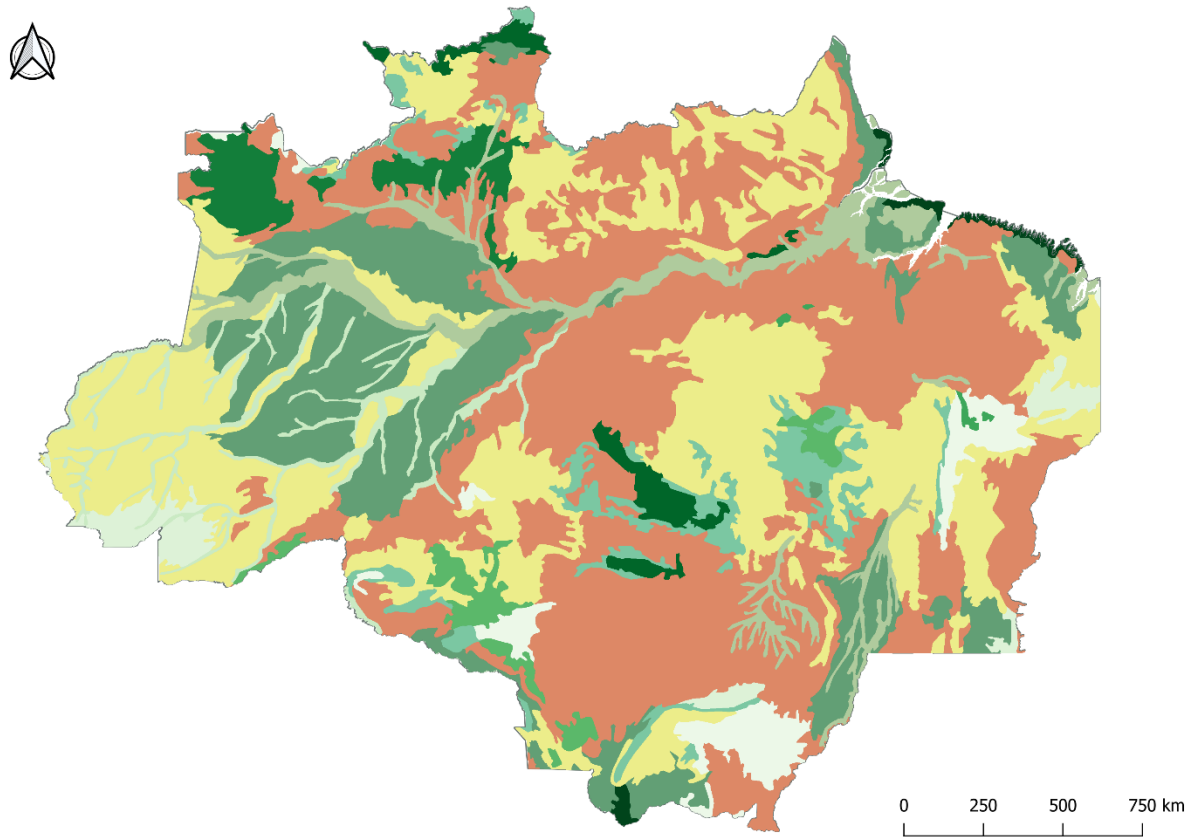
S0V1	S3V5	S6V4
S1V1	S3V8	S6V8
S1V2	S3V9	S6V9
S0V14	S4V1	S1V13
S0V15	S4V2	S1V14
S1V8	S4V4	S1V15
S1V9	S4V5	S2V14
S2V1	S4V8	S2V15
S2V2	S4V9	S3V13
S2V4	S5V1	S3V14
S2V5	S5V2	S3V15
S2V8	S5V4	S4V14
S2V9	S5V5	S4V15
S3V1	S5V8	S5V14
S3V2	S5V9	S5V15
S3V4	S6V2	S6V14

Quadro 1 – Interseção das classes de solo (S) com as classes de vegetação (V)

(V) Categoria de vegetação	(S) Categoria de solo
V1 Open Amazon forest	S1 HAC soils
V2 Dense Amazon forest	S2 LAC Latossolos
V3 Atlantic forest	S3 LAC non Latossolos
V4 Seasonal deciduous forest	S4 Sandy soils
V5 Seasonal semi-deciduous forest	S5 Wet soils
V6 Mixed ombrophilous forest	S6 Other soils
V7 South savanna	
V8 Amazon savanna	
V9 Savanna (Brazilian Cerrado)	
V10 South Steppe	
V11 Northeast steppe	
V12 Western Steppe (Pantanal)	
V13 Highland fields	
V14 Areas of pioneer formations	
V15 Woody oligotrophic vegetation	

Fonte: Bernoux *et al.* (2002)

Figura 20 – Mapa de Solos (QUESADA *et al.*, 2011)



Classes de solo














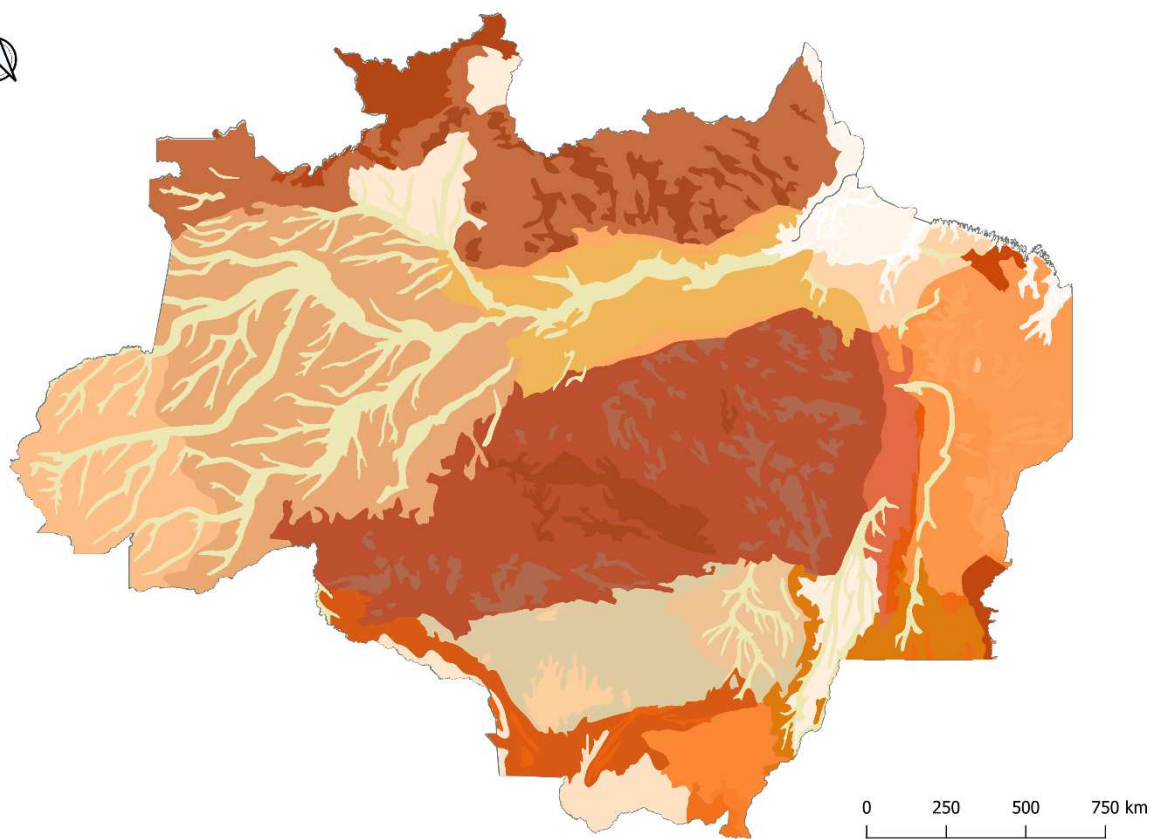
 Acrisols	 Leptosols
 Arenosols	 Lixisols
 Cambisols	 Nitisols
 Ferralsols	 Plinthosols
 Fluvisols	 Podzols
 Gleysols	 Regosols
 Histosols	

Figura 21 – Mapa dos Compartimentos de Relevo do Brasil (MMA, 2002)



- | | |
|---|---|
| Chapada do Meio-Norte | Lençóis Maranhenses |
| Chapada dos Parecis | Pantanaís Matogrossenses |
| Chapadas do Rio São Francisco | Pantanal do Rio Guaporé |
| Cristas e Colinas do Rio Gurupi | Patamares dos Rios São Francisco/Tocantins e Serra da Saudade |
| Depressão da Amazônia Meridional | Planalto Central Brasileiro |
| Depressão da Amazônia Setentrional | Planalto Central da Bacia do Paraná |
| Depressão de Boa Vista | Planalto da Caiapônia |
| Depressão do Baixo Rio Araguaia | Planalto de Maracaju |
| Depressão do Médio-Baixo Rio Amazonas | Planalto dos Guimarães |
| Depressão do Médios Rios Tocantins/Araguaia | Planalto dos Parecis |
| Depressão do Meio-Norte | Planaltos e Serras dos Altos Rios Paraguai/Guaporé |
| Depressão do Rio Araguaia/Pantanal | Planaltos Residuais da Amazônia Meridional - Serras do Cachimbo/Sucunduri |
| Depressão do Rio Xingu | Planaltos Marginaís ao Rio Amazonas |
| Depressão do Solimões | Planaltos Residuais da Amazônia Meridional |
| Depressão dos Altos Rios Paraguai/Guaporé | Planaltos Residuais da Amazônia Setentrional |
| Depressão dos Altos Rios Tocantins/Araguaia | Planaltos residuais dos Rios Tocantins/Araguaia |
| Depressão dos Rios Javari-Contamana | Planícies Fluviais e/ou Fluvioacustres |
| Depressão dos Rios Negro/Branco | Planícies Marinhas, Fluvio-marinhas e/ou Fluvioacustres |
| Escarpos e Reversos do Planalto de Roraima | Tabuleiros Costeiros |

Figura 22 – Mapa de Unidades de Relevo do Brasil (IBGE, 2006)

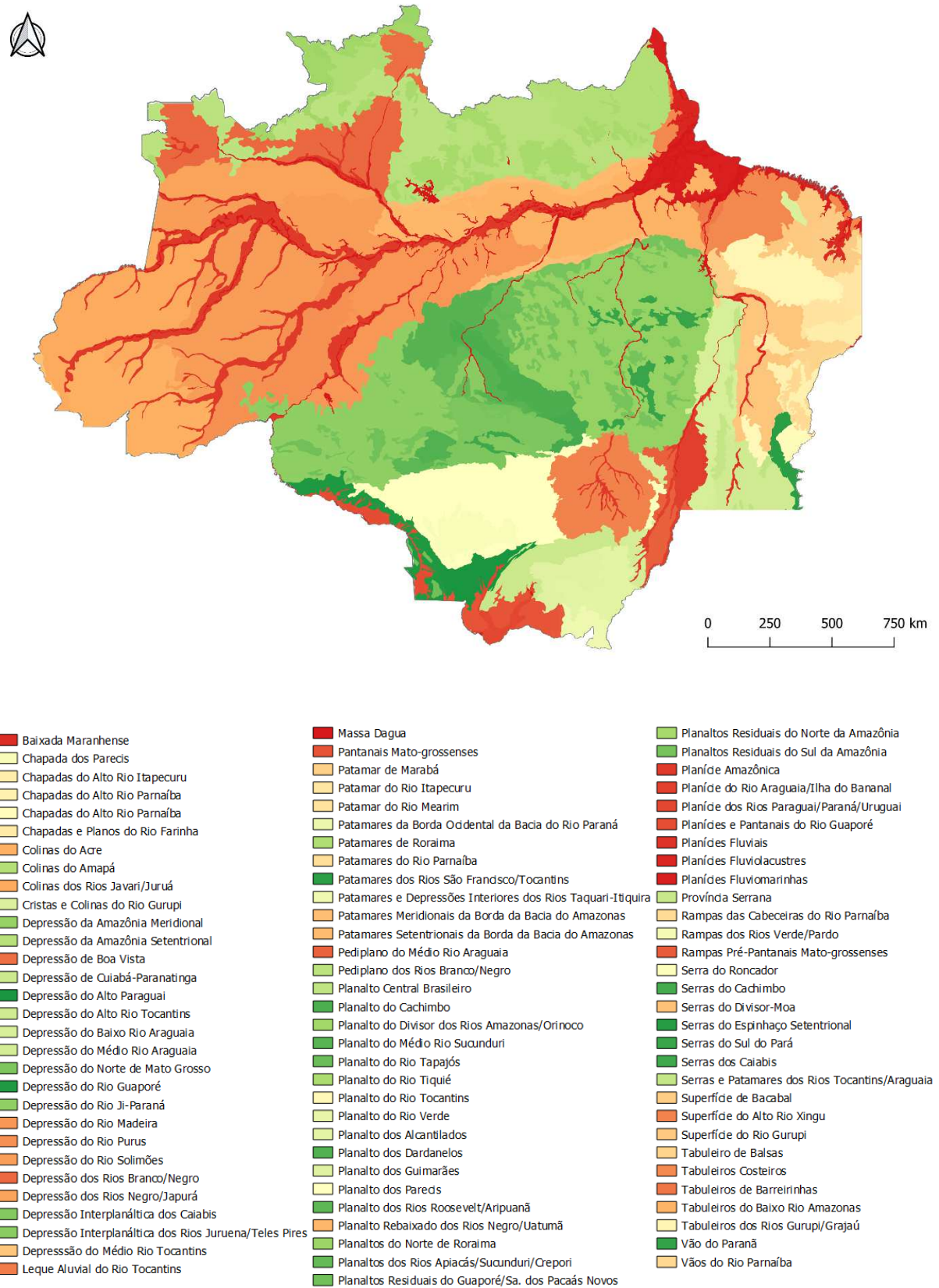
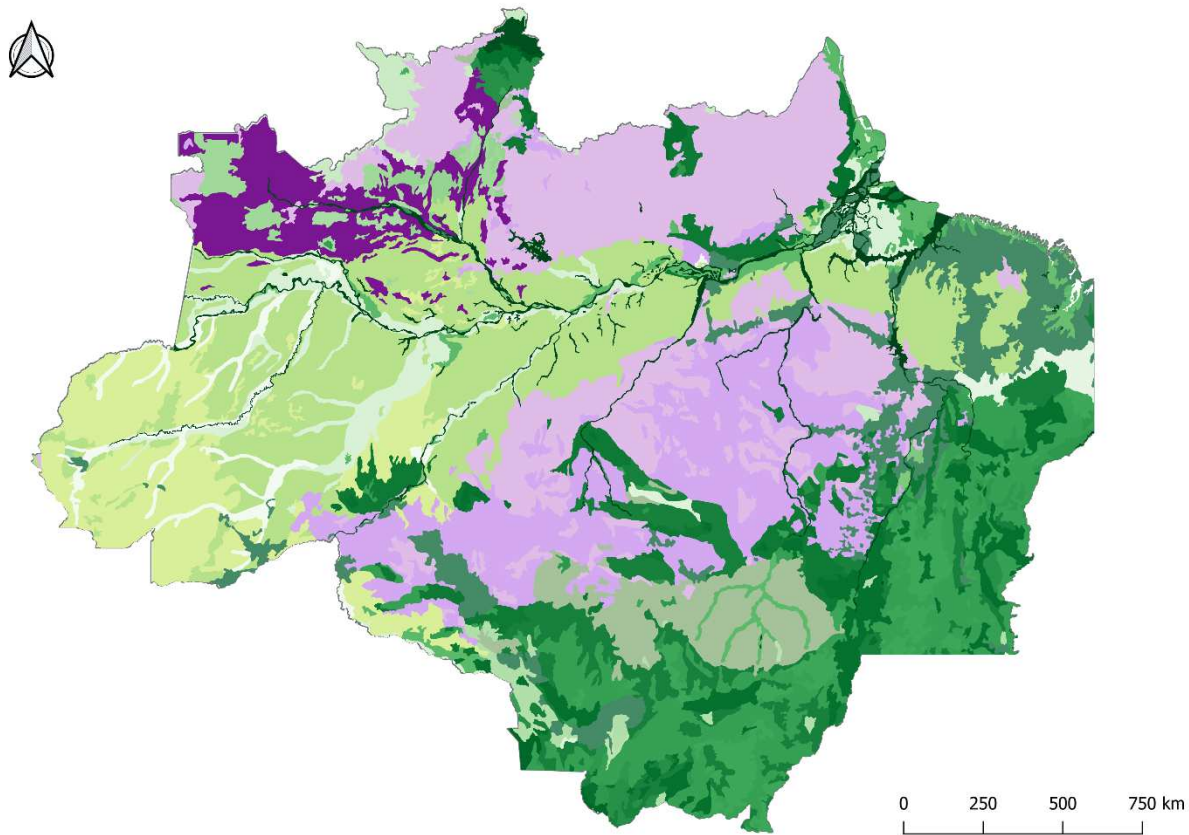


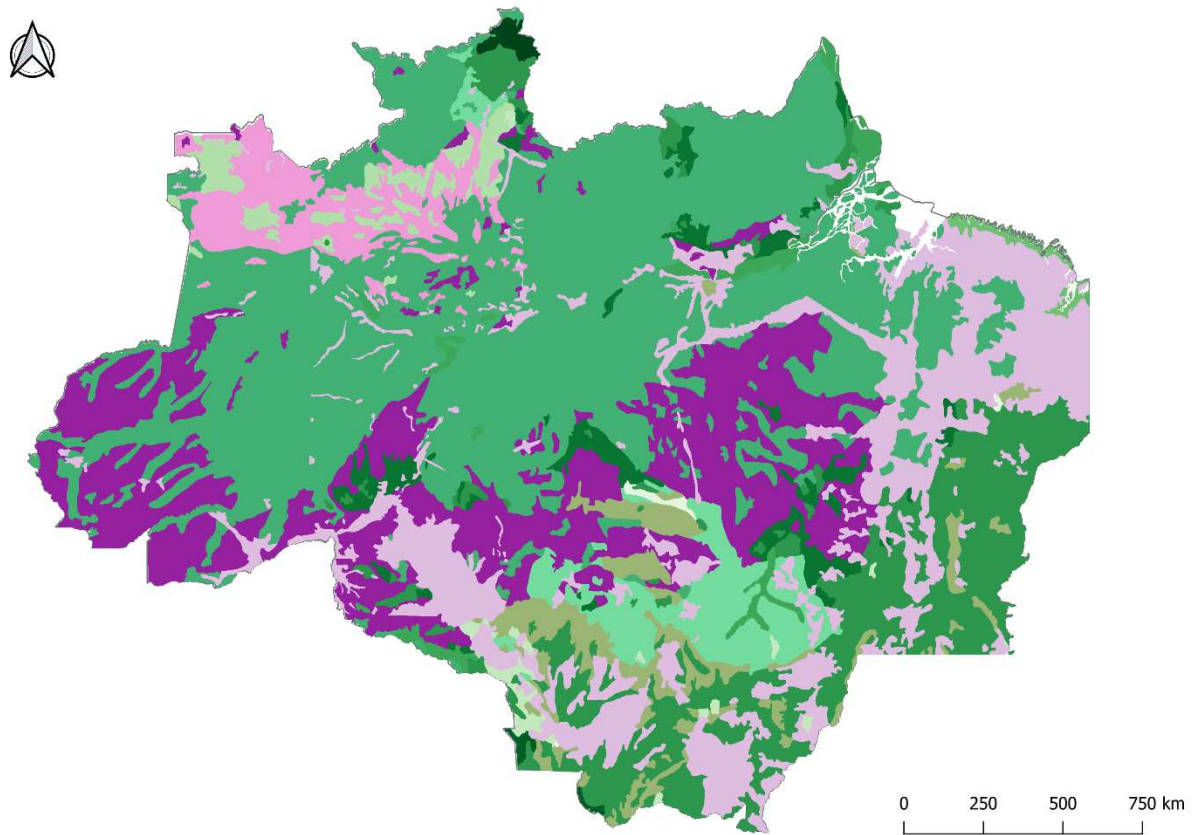
Figura 23 – Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 1992).



Classes de vegetação

Arbórea Aberta	Gramíneo-lenhosa
Arbórea Densa	Não classificado
Áreas de Formações Pioneiras	Refúgio Ecológico
Áreas de Formações Pioneiras - Influência Fluvial	Rios e Lagos
Áreas de Formações Pioneiras - Influência Fluviomarinha	Savana - Arbórea Aberta
Floresta Estacional Decidual	Savana - Atividades Agrícolas
Floresta Estacional Decidual Submontana	Savana - Floresta Estacional
Floresta Estacional Semidecidual Aluvial	Savana - Floresta Ombrófila
Floresta Estacional Semidecidual Submontana	Savana - Floresta Ombrófila Densa
Floresta Ombrófila - Floresta Estacional	Savana - Parque
Floresta Ombrófila Aberta	Savana Arbórea Densa
Floresta Ombrófila Aberta Submontana	Savana Estépica
Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas	Savana Estépica Parque
Floresta Ombrófila Densa Aluvial	Savana Estépica Arbórea Densa
Floresta Ombrófila Densa Montana	Savana gramíneo-lenhosa
Floresta Ombrófila Densa Submontana	Vegetação Secundária e Atividades Agrícolas
Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas	VLO Pantanos e A.Arenosa--F.Ombrofila

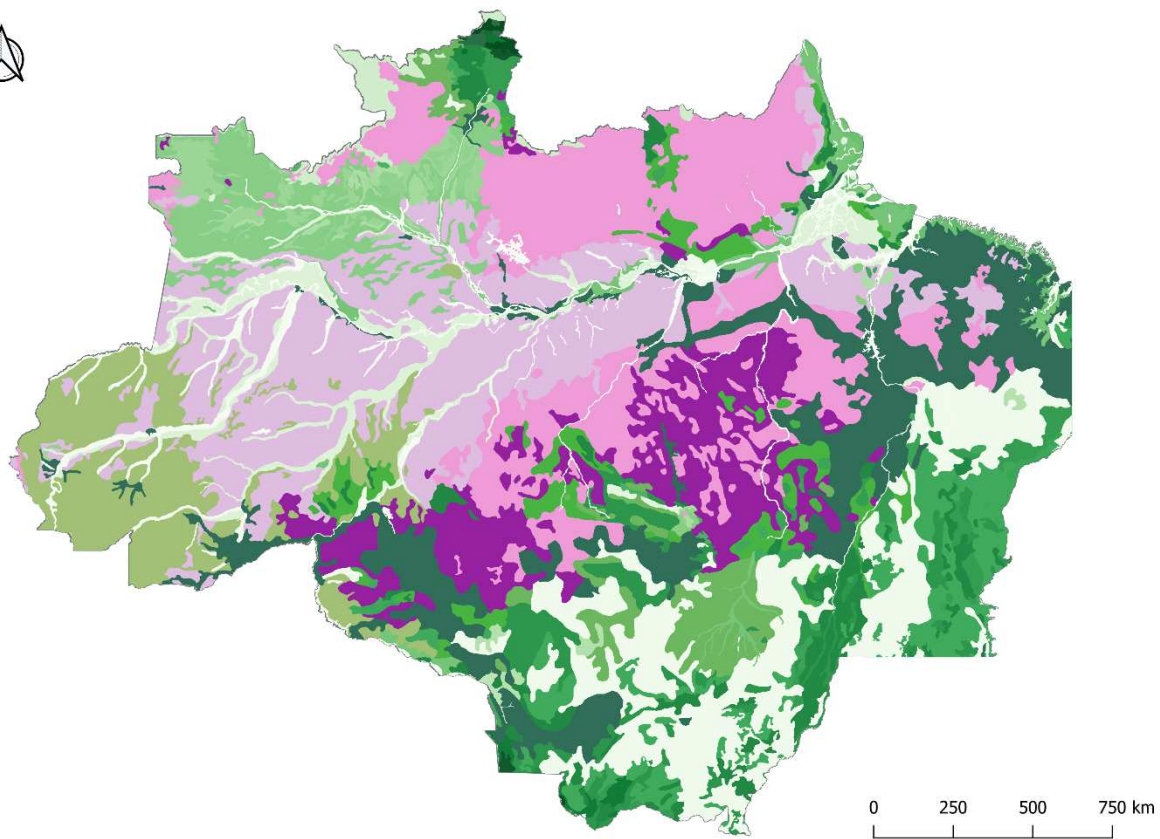
Figura 24 – Mapa de Vegetação da Amazônia Legal (MMA, 2002)



Classes de vegetação

Área Antropizada	Savana
Campinarana	Savana / Floresta Estacional
Campinarana / Floresta Ombrófila	Savana / Floresta Ombrófila
Floresta Estacional Decidual	Savana / Savana Estépica
Floresta Estacional Semidecidual	Savana Estépica
Floresta Ombrófila / Floresta Estacional	Vegetação com Influência Fluvial ou Lacustre
Floresta Ombrófila Aberta	Vegetação com Influência Fluviomarinha
Floresta Ombrófila Densa	Vegetação com Influência Marinha

Figura 25 – Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2004)



Classes de vegetação

Áreas das Formações Pioneiras Vegetação com Influência Fluvial e/ou Lacustre	Refúgios Vegetacionais Alto-Montano
Áreas das Formações Pioneiras Vegetação com Influência Fluvio- marinha	Refúgios Vegetacionais Montano
Áreas das Formações Pioneiras Vegetação com Influência Marinha	Savana Arborizada
Atividades Agrárias	Savana Estépica/Floresta Estacional
Campinarana Arborizada	Savana Florestada
Campinarana Arbustiva	Savana Gramíneo-Lenhosa
Campinarana Florestada	Savana Parque
Campinarana Gramíneo-Lenhosa	Savana/ Floresta Estacional
Campinarana/Floresta Ombrófila	Savana/Floresta Ombrófila
Floresta Ombrófila/Floresta Estacional	Savana/Formações Pioneiras
Floresta Estacional Decidual Submontana	Savana/Savana Estépica
Floresta Estacional Semidecidual Aluvial	Savana-Estépica Arborizada
Floresta Estacional Semidecidual Submontana	Savana-Estépica Florestada
Floresta Estacional Semidecidual Terras Baixas	Savana-Estépica Gramíneo-Lenhosa
Floresta Ombrófila Densa Aluvial	Savana-Estépica Parque
Floresta Ombrófila Densa Montana	Vegetação Ombrófila Aberta Aluvial
Floresta Ombrófila Densa Submontana	Vegetação Ombrófila Aberta Submontana
Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas	Vegetação Ombrófila Aberta Terras Baixas
Massa Dagua	Vegetação Secundária e Atividades Agrárias

Figura 26 – Mapa de Clima do Brasil (IBGE, 2002)

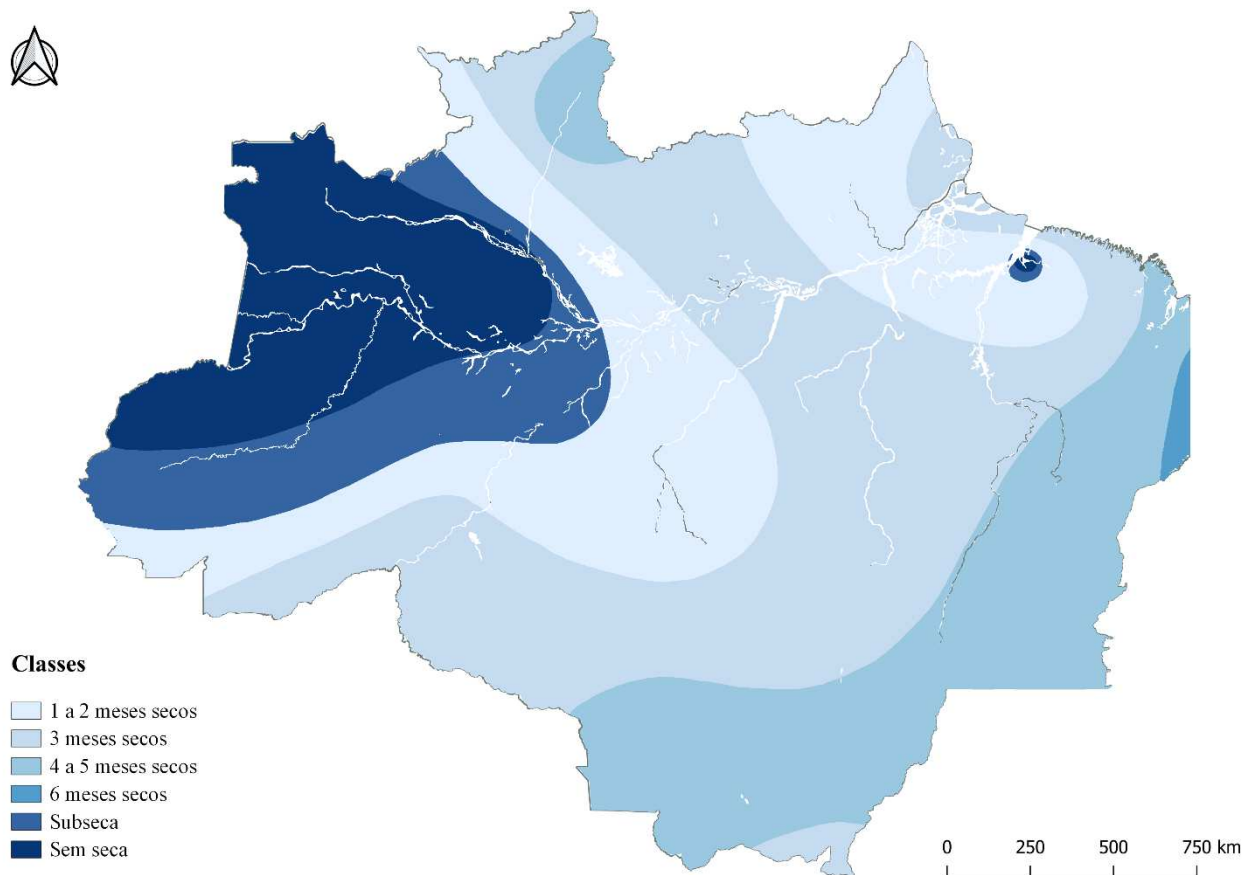
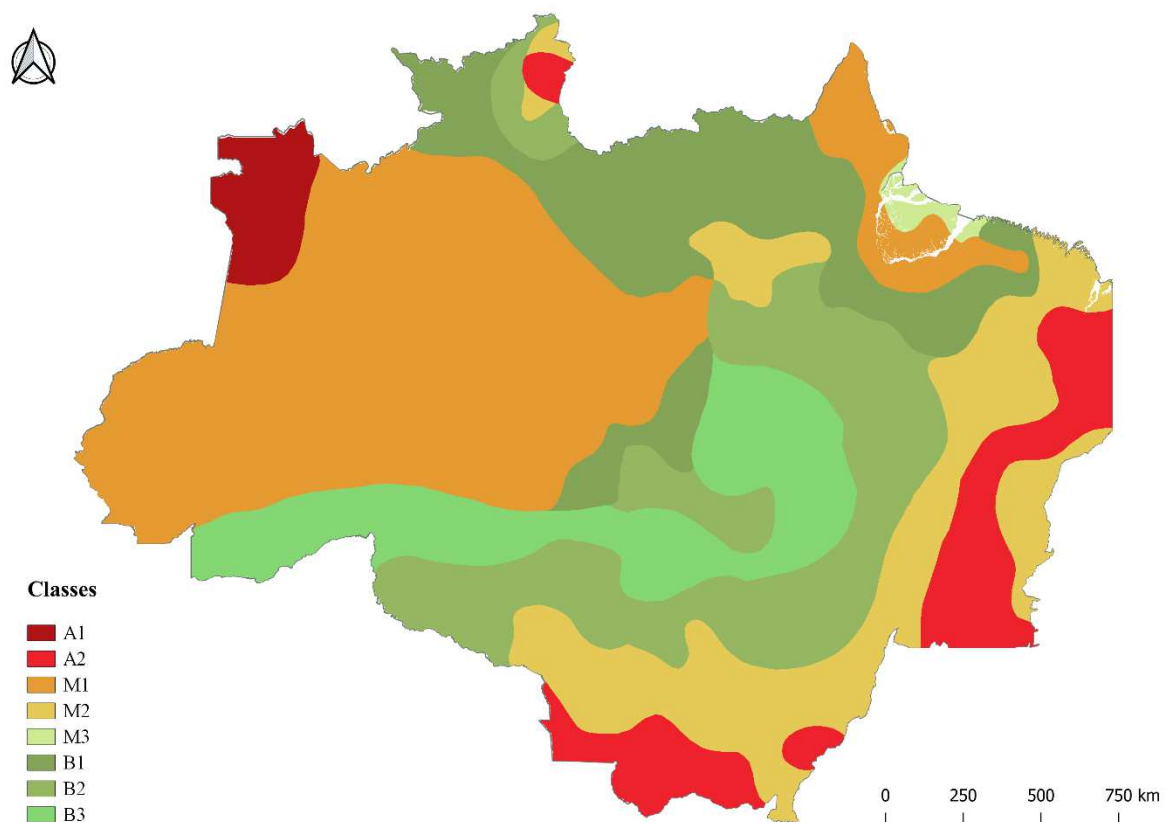


Figura 27 – Mapa de Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal (IBGE, 2014)



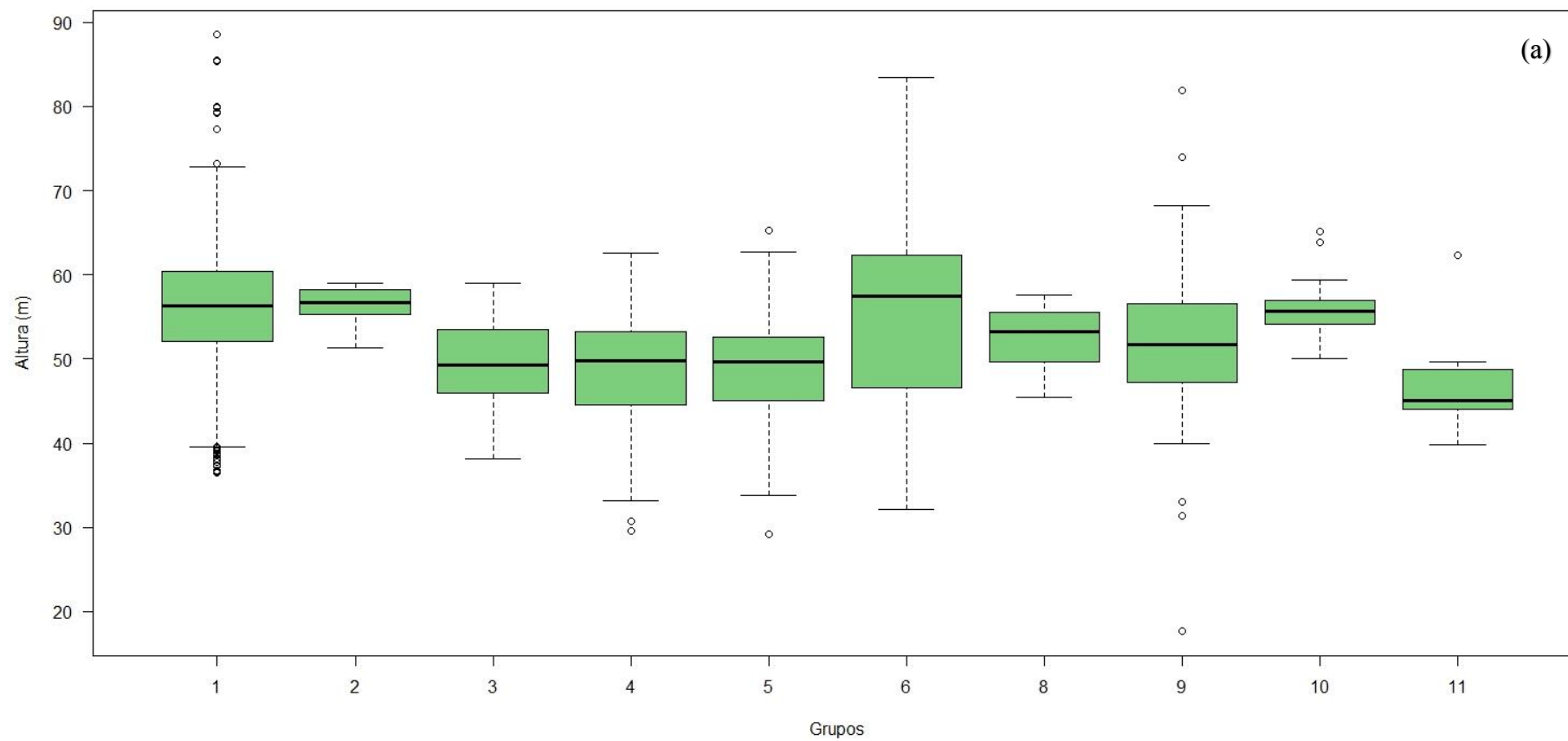
APÊNDICE B - GRÁFICOS E TABELAS

Tabela 7 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Solos do Brasil (IBGE, 2001)

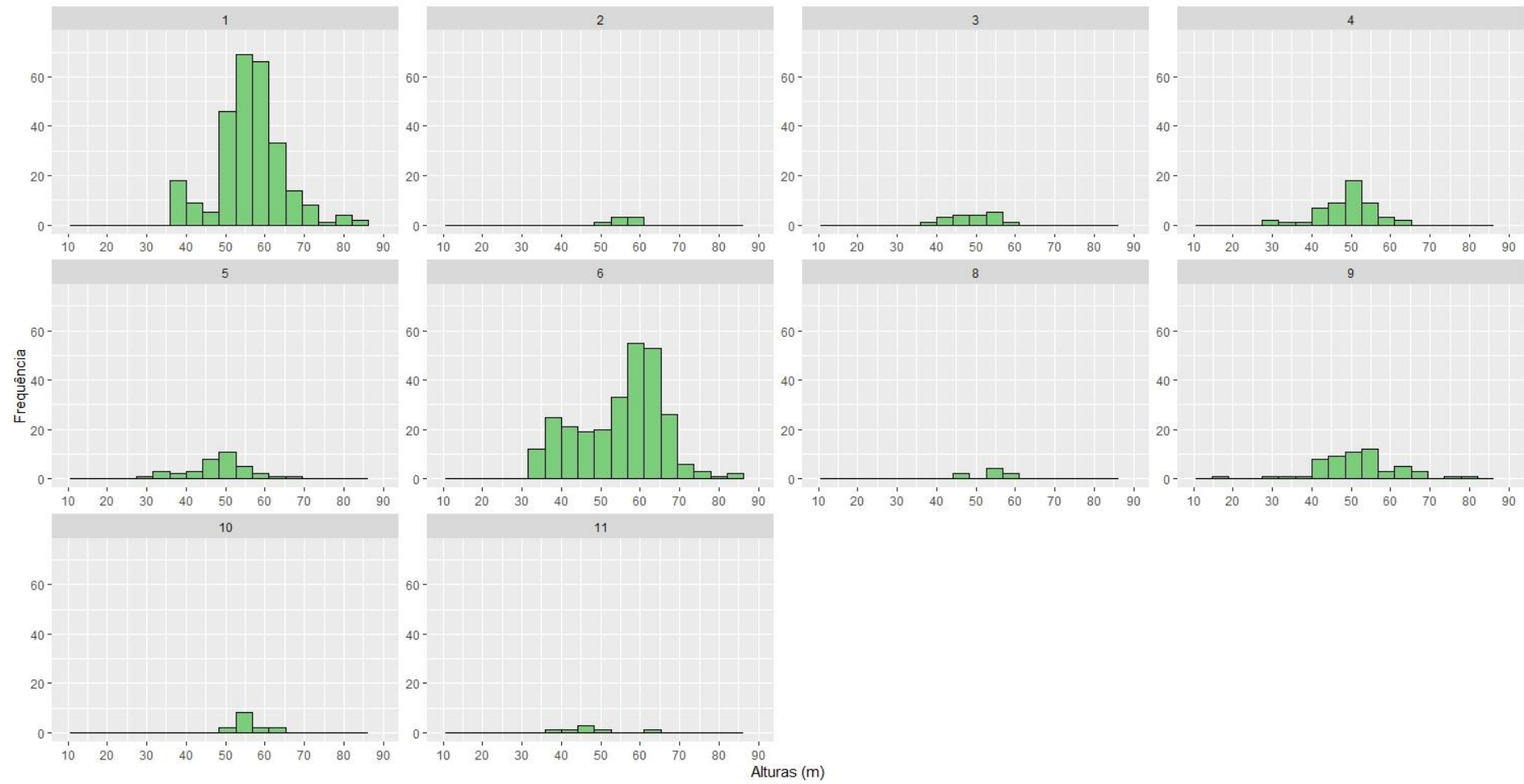
ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
1	Argissolo	276	56.4	8.68	36.52	52.08	56.34	60.43	88.50
2	Cambissolo	7	56.3	2.68	51.32	55.275	56.67	58.19	58.98
3	Espodossolo	18	49.1	5.67	38.12	46.0325	49.33	53.4375	59.03
4	Plintossolo	52	48.8	7.02	29.57	44.55	49.84	53.205	62.64
5	Gleissolo	37	48.1	7.74	29.21	45.04	49.64	52.62	65.33
6	Latossolo	276	55.0	10.52	32.19	46.58	57.50	62.32	83.44
8	Nitossolo	8	52.5	4.47	45.42	51.2575	53.31	54.5675	57.59
9	Neossolo	57	51.8	10.29	17.64	47.21	51.67	56.53	81.94
10	Luvissolo	14	56.4	4.16	50.05	54.3525	55.71	56.9125	65.12
11	Massa d'água	7	47.5	7.21	39.86	44.08	45.10	48.71	62.27

Fonte: autora.

Figura 28 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de solo



(b)



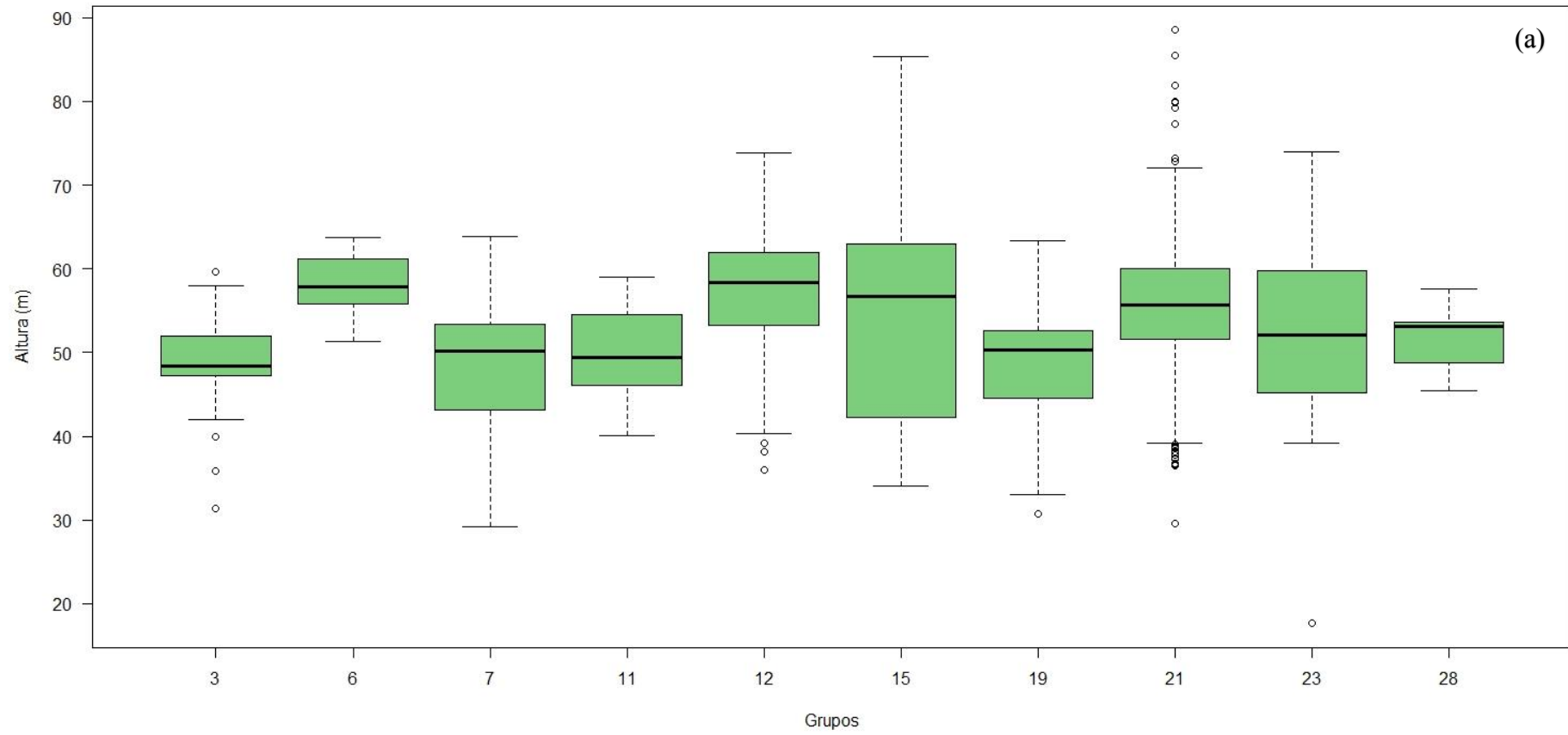
Fonte: autora.

Tabela 8 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Solos do Brasil (MMA, 2002)

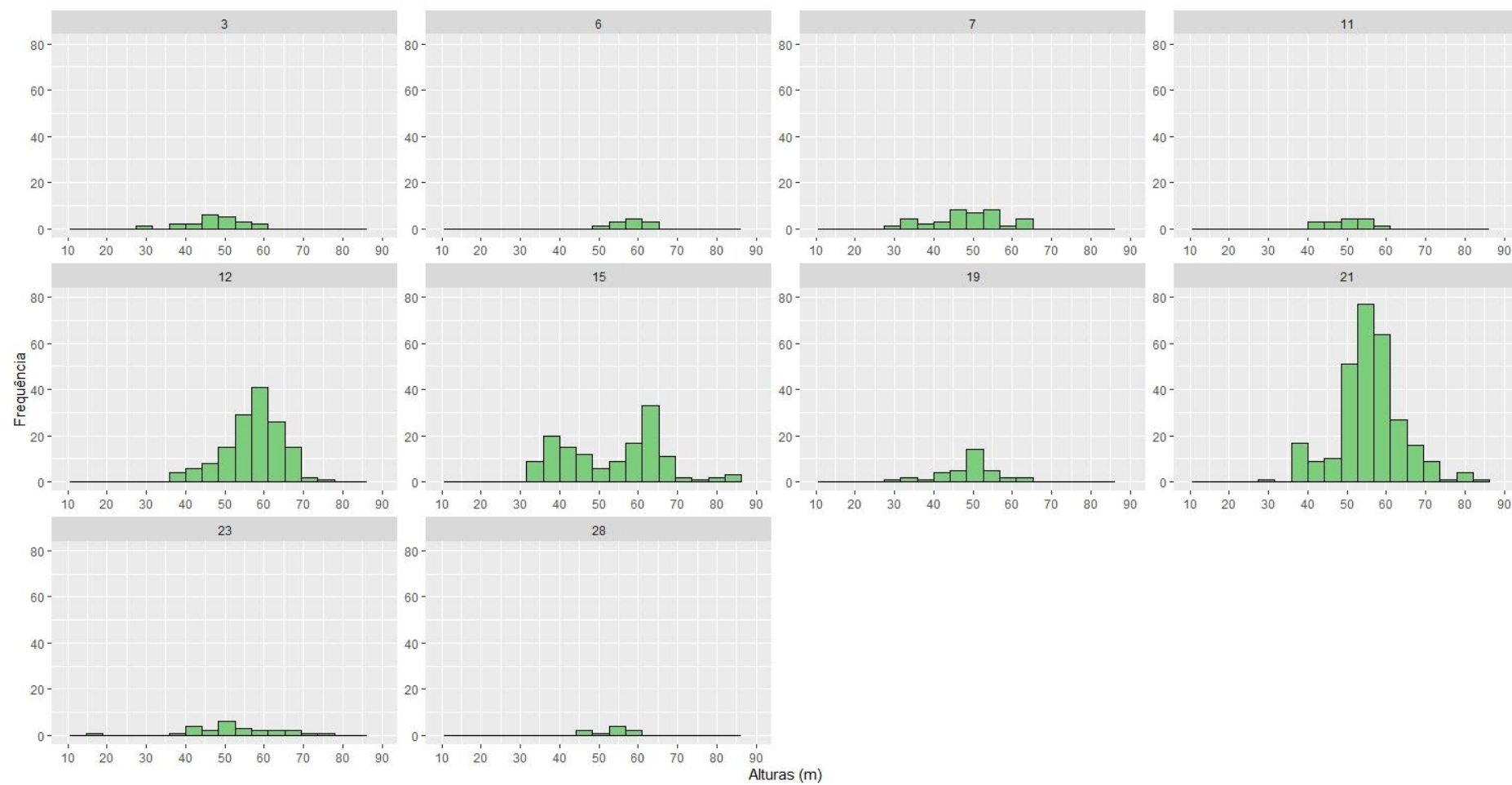
ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
3	Areias Quartzosas	21	48.3	7.0	31.4	47.2	48.4	52.0	59.7
6	Cambissolo	11	58.3	4.0	51.3	55.9	57.8	61.2	63.7
7	Gleissolo	37	48.7	8.8	29.2	45.0	50.5	53.4	63.8
11	Podzol Hidromorfo	15	49.8	5.4	40.1	46.0	49.4	54.5	59.0
12	Latossolo Amarelo	147	57.2	7.3	36.0	53.2	58.4	62.0	73.8
15	Latossolo Vermelho-Amarelo	140	53.8	12.4	34.0	42.4	56.8	62.9	85.4
19	Plintossolo	34	49.1	7.6	30.7	47.5	50.4	52.7	63.3
21	Podzólico Vermelho-Amarelo	287	55.9	8.6	29.6	51.7	55.7	60.0	88.5
23	Solos Litólicos	24	52.8	12.0	17.6	44.8	52.3	60.3	73.9
28	Terra Roxa Estruturada	8	52.5	4.5	45.4	51.3	53.3	54.6	57.6

Fonte: autora.

Figura 29 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de solo



(b)



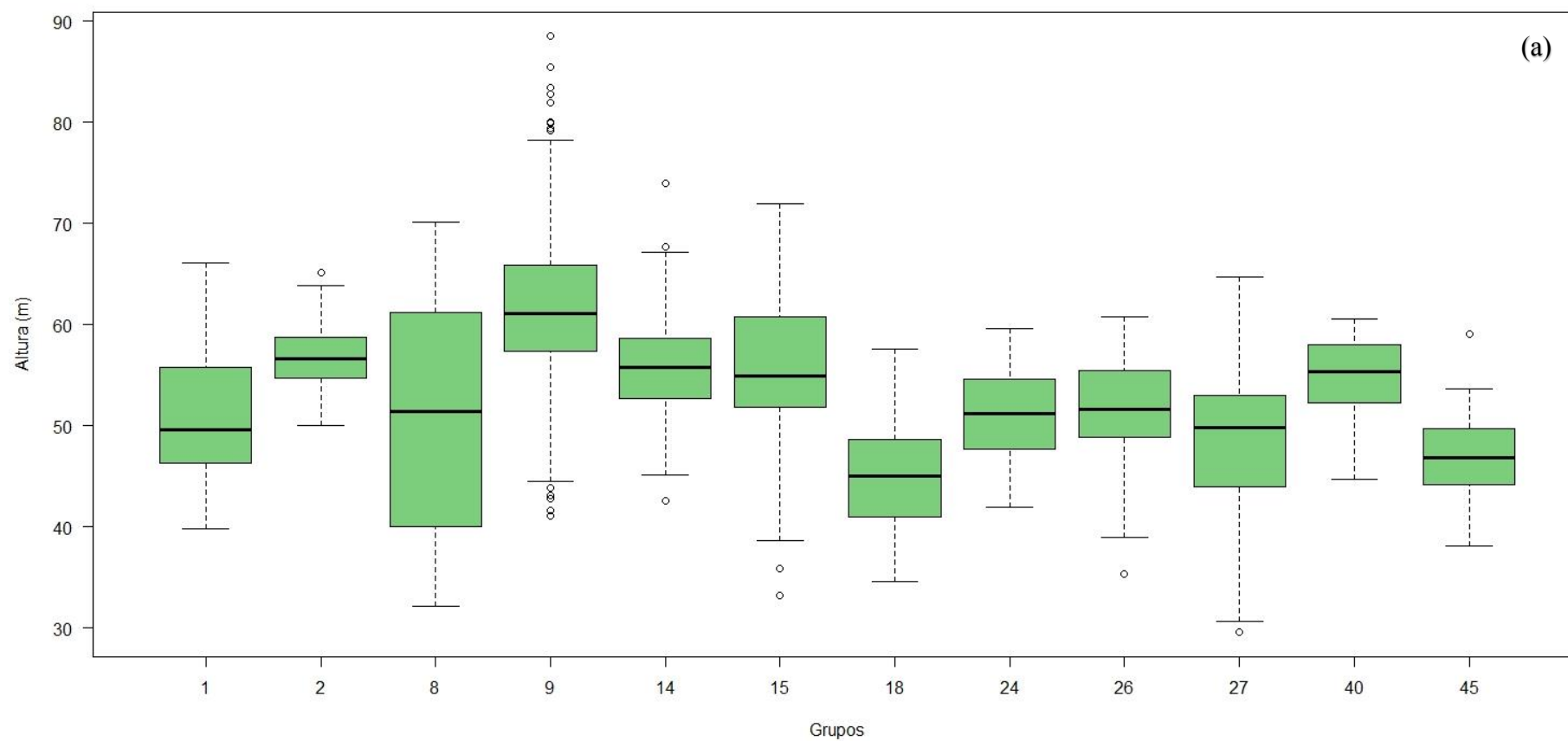
Fonte: autora.

Tabela 9 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de estoque de carbono no solo (BERNOUX *et al.*, 2002)

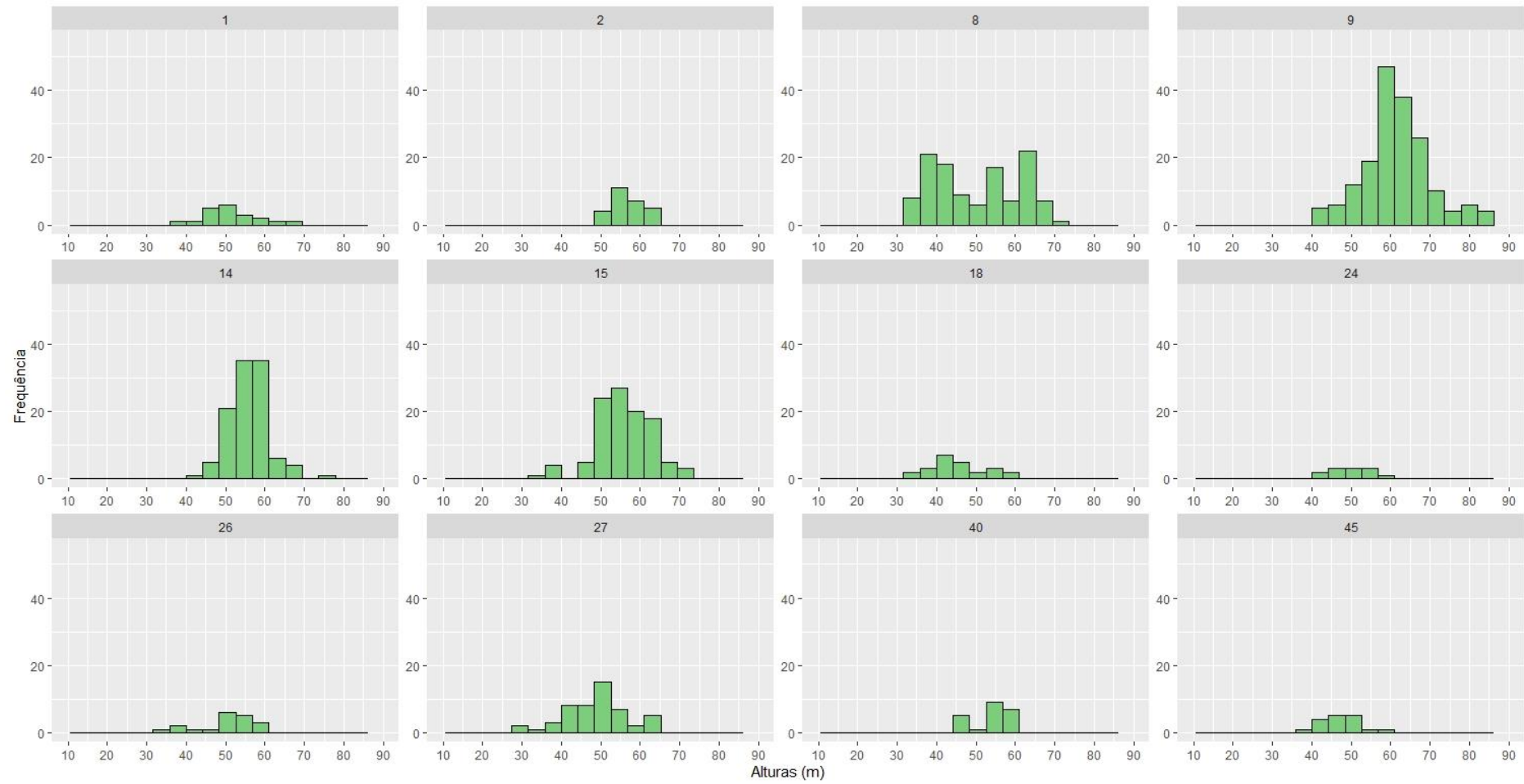
ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
1	Água	20	51.2	6.7	39.9	46.3	49.7	55.4	66.1
2	S1V1 - Solos HAC/Floresta Amazônica Aberta	27	56.9	3.7	50.1	54.7	56.7	58.8	65.1
8	S2V1 - Latossolos LAC/Floresta Amazônica Aberta	116	50.2	10.8	32.2	40.1	51.4	61.1	70.1
9	S2V2 - Latossolos LAC/Floresta Amazônica Densa	178	61.7	8.7	41.1	57.3	61.1	65.8	88.5
14	S3V1 - não Latossolos LAC/Floresta Amazônica Aberta	108	55.8	4.9	42.6	52.8	55.8	58.6	73.9
15	S3V2 - não Latossolos LAC/Floresta Amazônica Densa	107	55.8	7.1	33.2	51.9	55.0	60.8	72.0
18	S3V8 - não Latossolos LAC/Savana Amazônica	24	45.7	6.6	34.6	41.3	45.0	48.5	57.6
24	S1V0 - Solos HAC	12	50.6	5.4	42.0	47.8	51.3	54.4	59.7
26	S5V1 - Solos úmidos/Floresta Amazônica Aberta	19	50.8	7.1	35.4	48.8	51.7	55.5	60.7
27	S5V2 - Solos úmidos/Floresta Amazônica Densa	51	48.8	8.0	29.6	43.9	49.8	53.1	64.7
40	S2V15 - Latossolos LAC/Vegetação oligotrófica lenhosa	22	54.0	5.0	44.7	52.5	55.3	57.8	60.6
45	S4V15 - Solos arenosos/Vegetação oligotrófica lenhosa	17	47.5	5.0	38.1	44.2	46.8	49.8	59.0

Fonte: autora.

Figura 30 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de solo



(b)



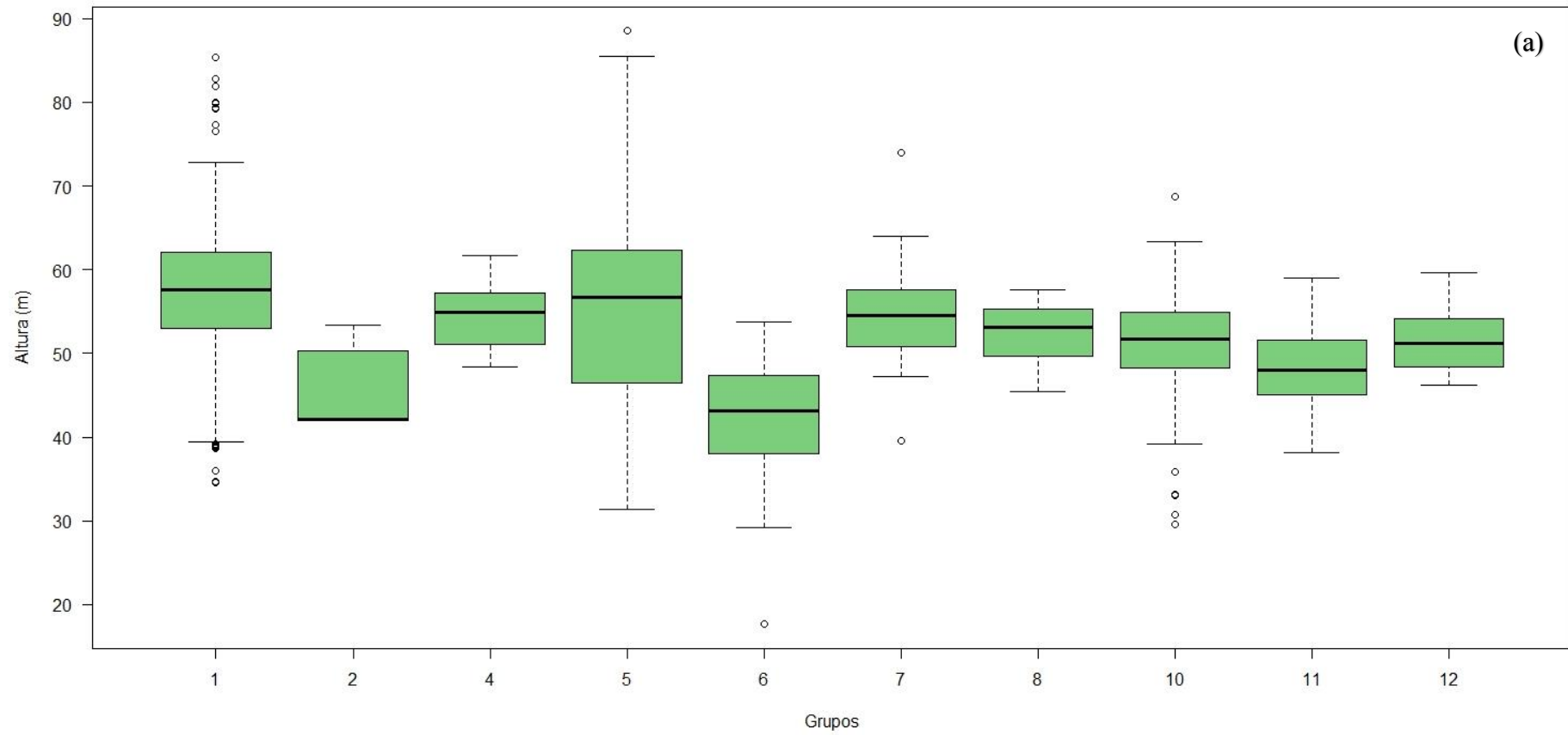
Fonte: autora.

Tabela 10 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de solos (QUESADA *et al.*, 2011)

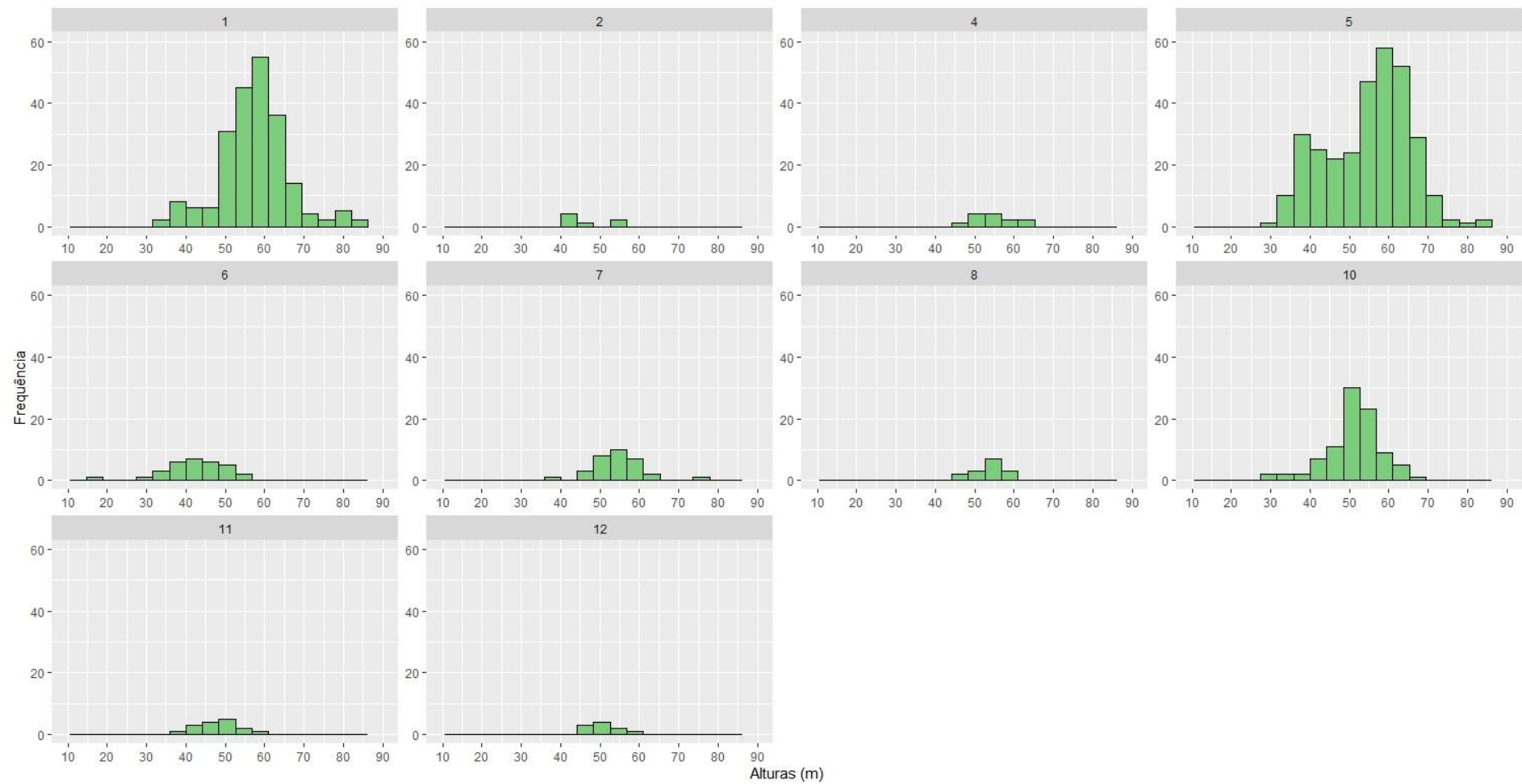
ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
1	Acrisols	216	57.50	8.53	34.63	53.1	57.56	62.13	85.41
2	Arenosols	7	46.03	5.33	42	42.0	42.15	50.33	53.34
4	Fluvisols	13	54.67	4.68	48.35	51.1	54.93	57.25	61.67
5	Ferralsols	314	54.88	10.61	31.39	46.5	56.73	62.29	88.5
6	Gleysols	31	42.30	7.48	17.64	38.1	43.11	47.32	53.81
7	Leptosols	32	54.67	6.17	39.56	50.9	54.55	57.32	73.93
8	Lixisols	15	52.58	3.91	45.42	49.6	53.12	55.27	57.59
10	Plinthosols	92	50.97	7.04	29.57	48.3	51.70	54.93	68.73
11	Podzols	16	48.44	5.19	38.12	45.6	48.03	51.58	59.03
12	Regosols	10	51.59	3.91	46.21	48.8	51.25	53.64	59.65

Fonte: autora.

Figura 31 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de solo



(b)



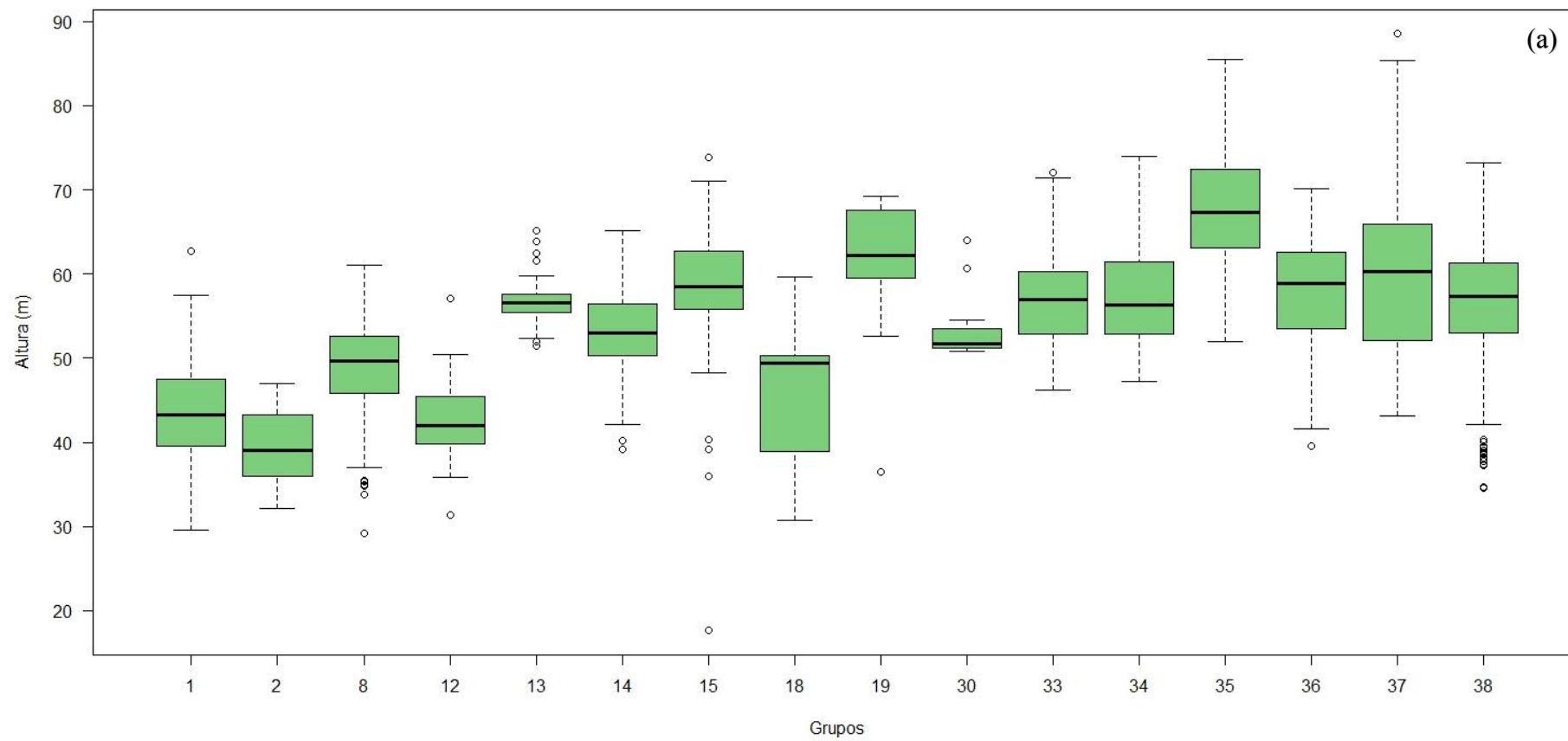
Fonte: autora.

Tabela 11 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa dos Compartimentos de Relevo do Brasil (IBGE, 2002)

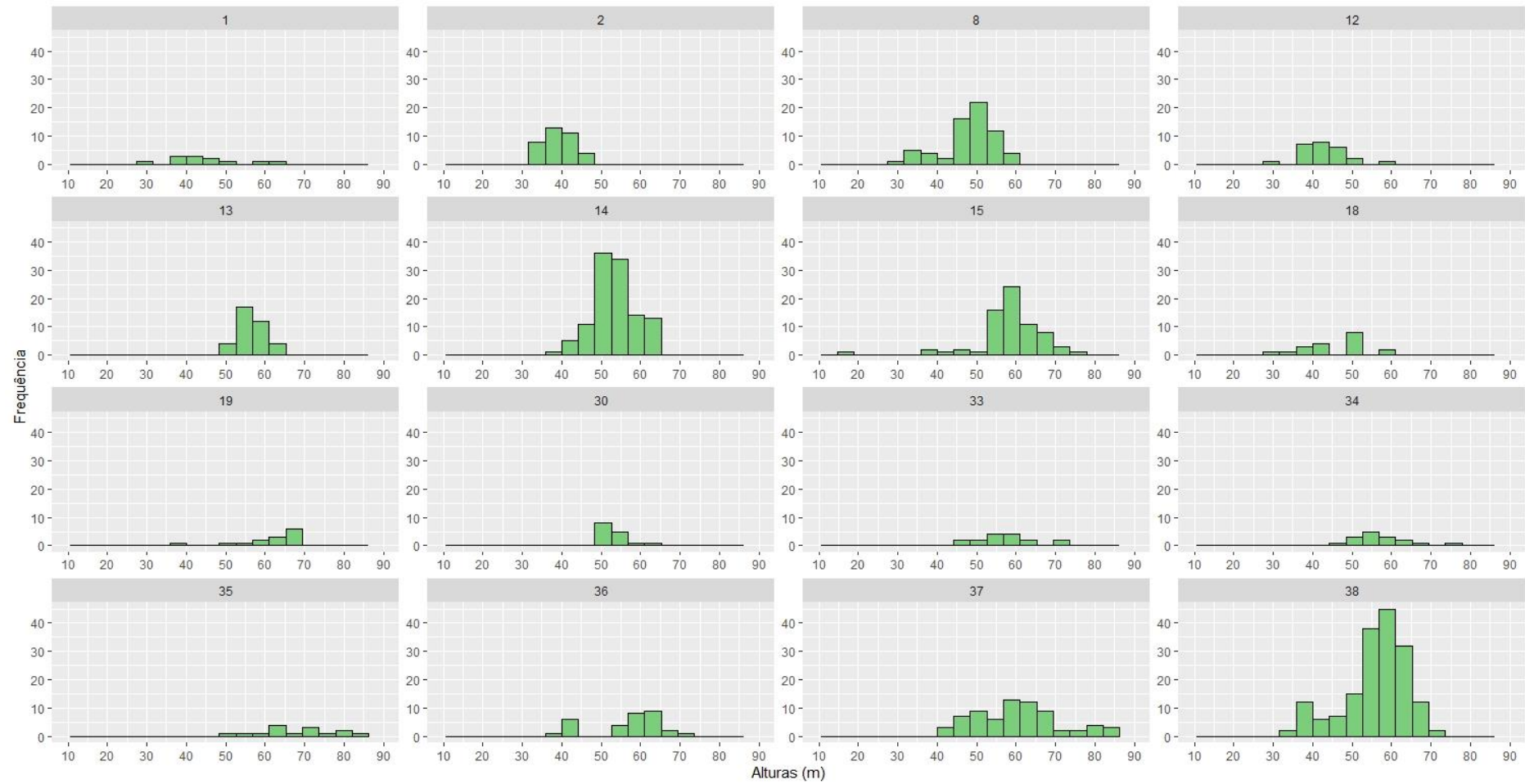
ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
1	Planícies Marinhas, Fluviomarinhas e/ou Fluviolacustres	12	44.71	8.71	29.57	39.70	43.26	46.53	62.69
2	Depressão do Rio Xingu	36	39.61	4.06	32.19	36.05	39.10	43.17	47.02
8	Planícies Fluviais e/ou Fluviolacustres	66	48.43	6.87	29.21	45.90	49.66	52.50	61.01
12	Planalto dos Parecis	25	42.79	5.30	31.39	39.85	42.00	45.45	57.11
13	Depressão dos Rios Javari-Contamana	37	56.76	3.07	51.44	55.37	56.59	57.61	65.12
14	Depressão do Solimões	114	53.32	5.36	39.17	50.36	52.99	56.37	65.14
15	Depressão do Médio-Baixo Rio Amazonas	70	58.44	8.53	17.64	55.81	58.49	62.63	73.80
18	Depressão do Meio-Norte	19	45.60	8.41	30.70	38.92	49.38	50.34	59.70
19	Depressão do Médios Rios Tocantins/Araguaia	14	60.84	8.80	36.52	59.71	62.20	67.07	69.24
30	Depressão dos Altos Rios Paraguai/Guaporé	15	53.50	3.82	50.80	51.21	51.66	53.52	64.00
33	Escarpas e Reversos do Planalto de Roraima	16	57.47	7.16	46.21	53.27	56.96	59.73	72.00
34	Planaltos Residuais da Amazônia Meridional - Serras do Cachimbo/Sucunduri	16	57.37	7.06	47.21	53.38	56.36	60.52	73.93
35	Planaltos Residuais da Amazônia Setentrional	15	68.25	9.33	51.94	63.16	67.34	72.38	85.44
36	Planaltos Residuais da Amazônia Meridional	31	56.46	8.82	39.56	53.47	58.87	62.64	70.10
37	Depressão da Amazônia Setentrional	71	61.04	11.02	43.14	52.06	60.34	65.86	88.50
38	Depressão da Amazônia Meridional	171	55.92	7.99	34.63	53.00	57.39	61.30	73.17

Fonte: autora.

Figura 32 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de relevo



(b)



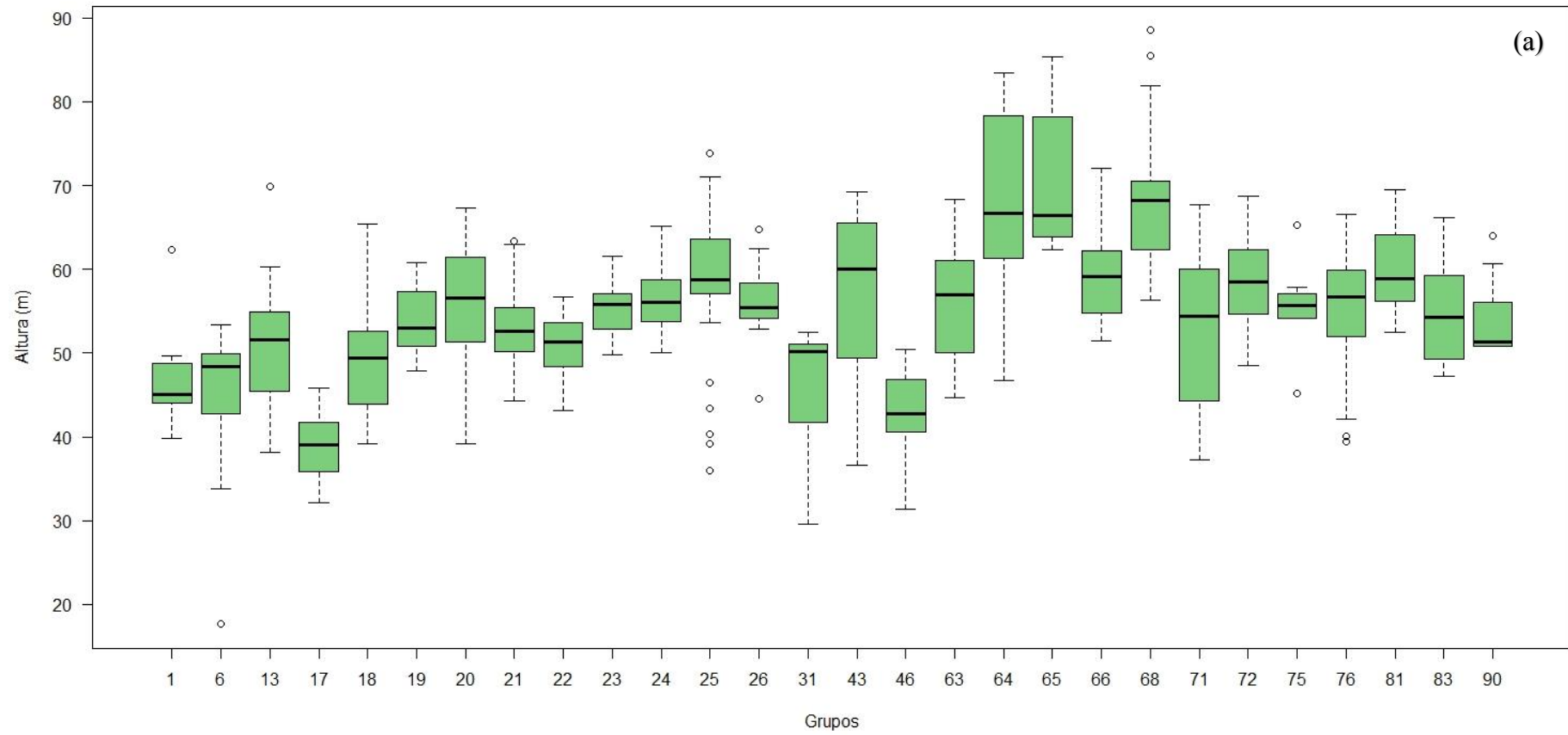
Fonte: autora.

Tabela 12 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Unidades de Relevo do Brasil (IBGE, 2006)

ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
1	Massa Dagua	7	47.5	7.21	39.86	44.08	45.1	48.71	62.27
6	Planície Amazônica	24	45.3	8.29	17.64	43.66	48.3	49.85	53.39
13	Depressão dos Rios Branco/Negro	23	51.0	7.34	38.12	45.42	51.6	54.96	69.85
17	Superfície do Alto Rio Xingu	42	38.9	3.55	32.19	35.88	39.0	41.72	45.78
18	Tabuleiros Costeiros	8	49.6	8.17	39.20	45.06	49.4	51.38	65.45
19	Depressão do Rio Purus	22	53.6	3.98	47.91	50.84	53.0	56.74	60.74
20	Depressão do Rio Madeira	40	55.8	7.71	39.17	51.38	56.6	61.41	67.33
21	Depressão do Rio Solimões	60	53.2	4.40	44.29	50.22	52.6	55.26	63.33
22	Depressão dos Rios Negro/Japurá	15	51.0	4.18	43.11	48.40	51.3	53.70	56.75
23	Colinas dos Rios Javari/Juruá	31	55.2	2.68	49.76	52.81	55.8	57.07	61.50
24	Colinas do Acre	24	56.3	3.96	50.05	53.98	56.1	58.67	65.12
25	Tabuleiros do Baixo Rio Amazonas	50	59.3	7.99	35.96	57.19	58.7	63.53	73.80
26	Planalto Rebaixado dos Rios Negro/Uatumã	13	56.0	4.99	44.54	54.16	55.4	58.38	64.82
31	Superfície do Rio Gurupi	7	45.4	9.67	29.57	41.72	50.2	51.08	52.51
43	Tabuleiros dos Rios Gurupi/Grajaú	26	56.6	10.52	36.61	49.42	60.0	65.46	69.24
46	Planalto dos Parecis	24	43.2	4.18	31.39	40.61	42.8	46.71	50.49
63	Pediplano dos Rios Branco/Negro	30	56.4	6.40	44.70	50.51	57.0	60.91	68.36
64	Depressão da Amazônia Setentrional	16	68.0	10.79	46.76	61.88	66.7	77.80	83.44
65	Colinas do Amapá	14	70.4	8.20	62.32	64.17	66.4	77.80	85.41
66	Patamares de Roraima	11	59.9	6.75	51.46	54.80	59.1	62.15	72.00
68	Planaltos Residuais do Norte da Amazônia	16	68.9	9.27	56.26	63.15	68.2	70.13	88.50
71	Depressão da Amazônia Meridional	75	52.7	8.86	37.28	44.26	54.4	60.04	67.73
72	Depressão do Rio Ji-Paraná	57	58.7	4.90	48.48	54.60	58.5	62.29	68.73
75	Depressão do Norte de Mato Grosso	10	55.7	4.92	45.25	54.27	55.7	57.03	65.33
76	Planaltos Residuais do Sul da Amazônia	24	54.7	7.72	39.38	52.05	56.7	59.83	66.56
81	Planalto do Médio Rio Sucunduri	15	60.4	5.49	52.50	56.15	58.9	64.07	69.52
83	Planalto do Cachimbo	8	54.9	6.52	47.21	49.55	54.3	59.00	66.12
90	Depressão do Rio Guaporé	8	53.9	5.26	50.80	50.89	51.3	53.86	64.00

Fonte: autora.

Figura 33 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de relevo



(b)

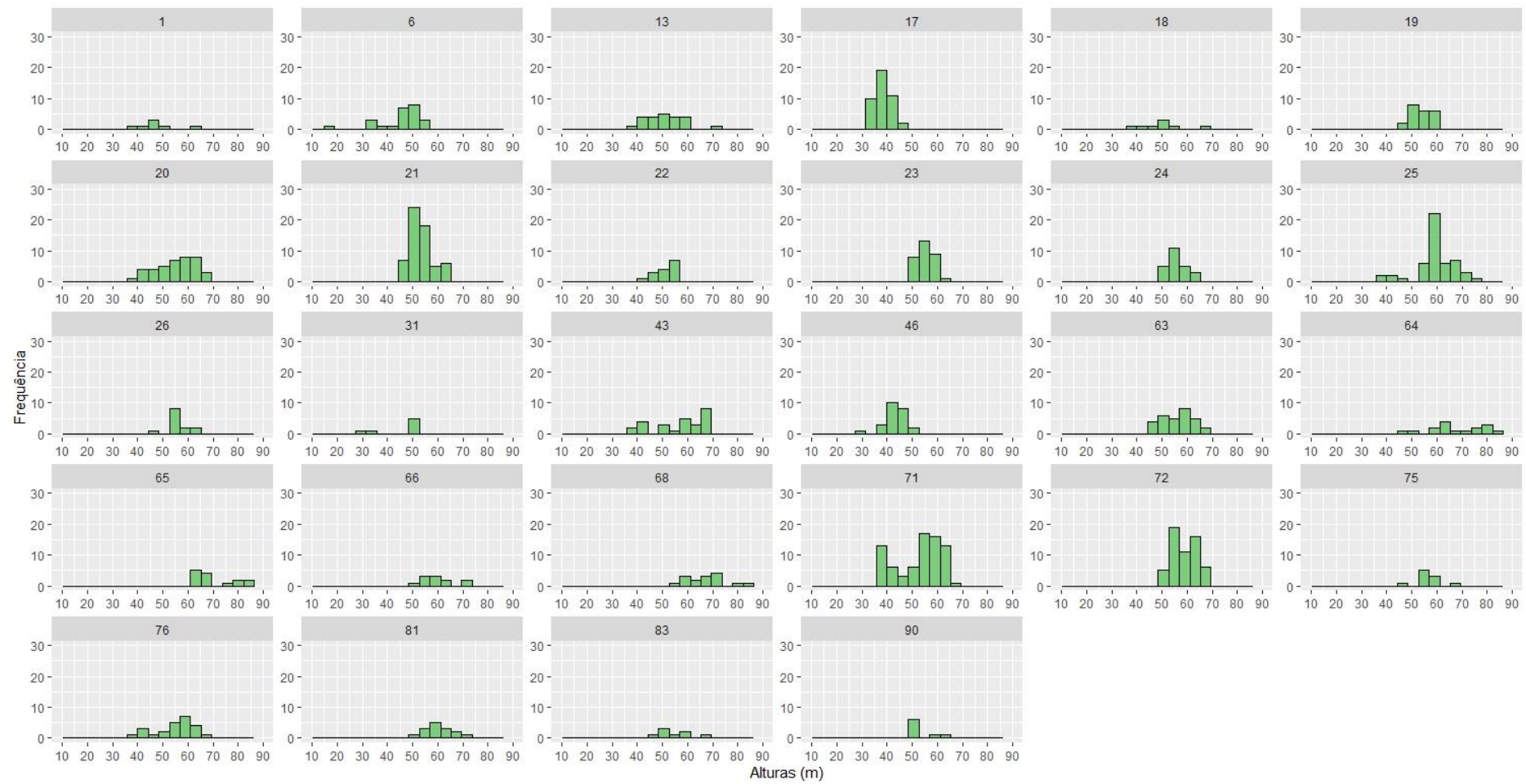
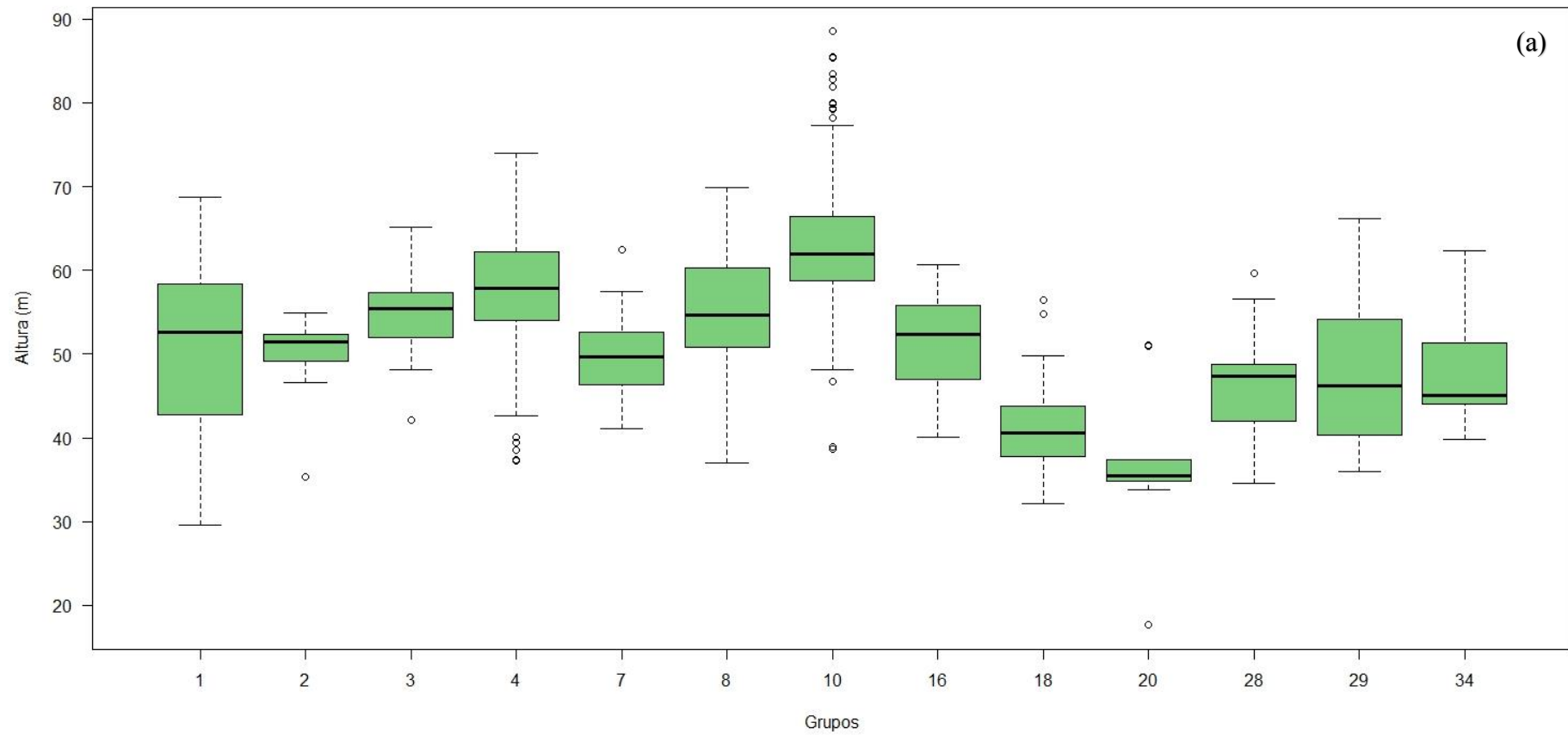


Tabela 13 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 1922)

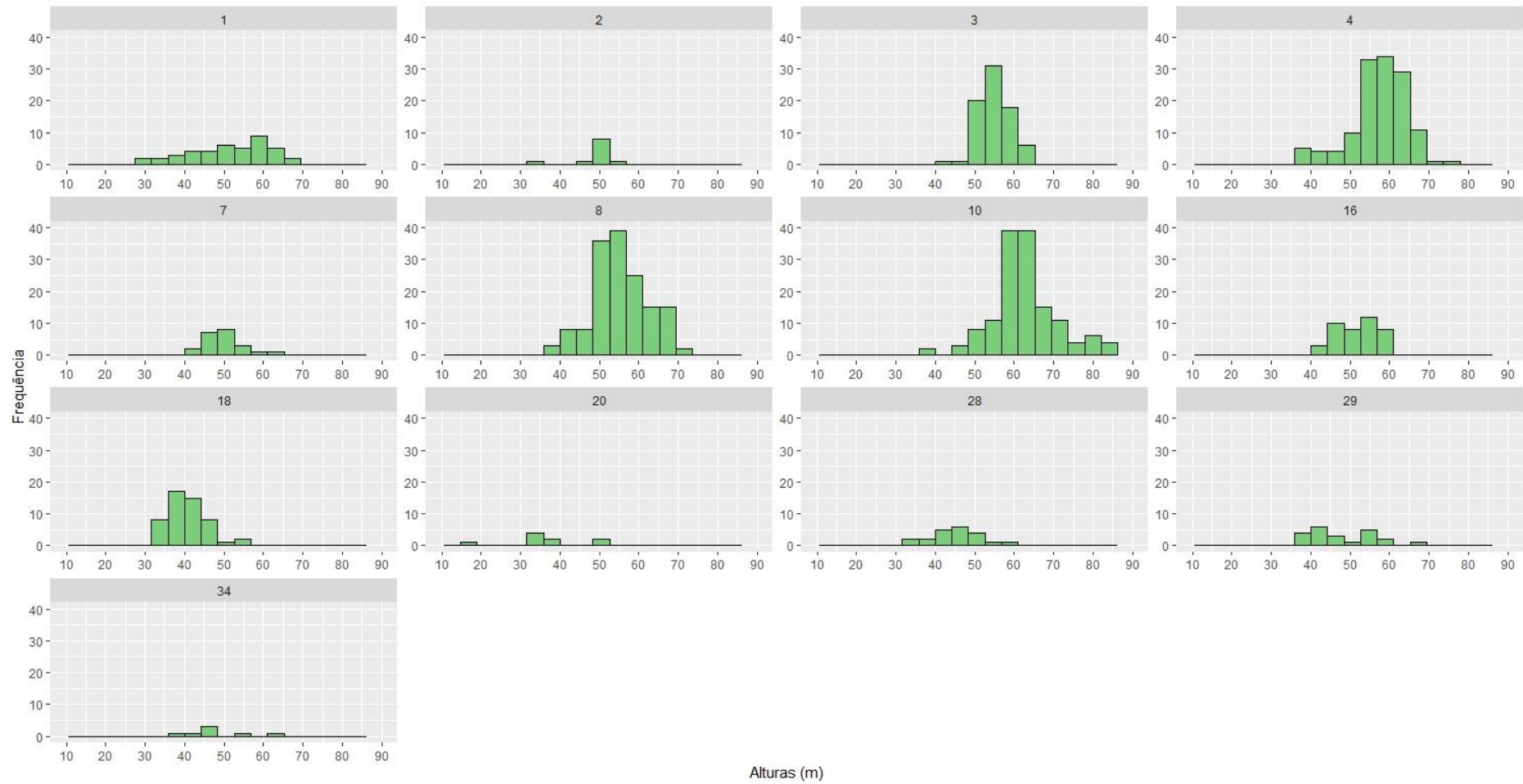
ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
1	Vegetação Secundária e Atividades Agrícolas	42	50.78	10.52	29.57	43.35	52.64	58.38	68.73
2	Floresta Ombrófila Aberta Aluvial	11	49.70	5.23	35.4	49.19	51.44	52.30	54.95
3	Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas	77	55.09	3.99	42.09	51.93	55.37	57.33	65.12
4	Floresta Ombrófila Aberta Submontana	132	57.40	6.99	37.28	54.04	57.85	62.18	73.93
7	Floresta Ombrófila Densa Aluvial	22	49.75	4.94	41.06	46.49	49.63	52.23	62.4
8	Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas	151	55.33	7.03	37.04	50.81	54.65	60.3	69.85
10	Floresta Ombrófila Densa Submontana	143	62.89	8.53	38.63	58.72	61.89	66.45	88.5
16	VLO Pantanos e A.Arenosa--F.Ombrofila	41	51.84	5.39	40.08	47.04	52.3	55.78	60.61
18	Floresta Ombrófila - Floresta Estacional	51	41.00	4.97	32.19	37.79	40.55	43.74	56.5
20	Áreas de Formações Pioneiras - Influência Fluvial	9	36.89	9.92	17.64	34.86	35.48	37.41	51.03
28	Savana - Floresta Estacional	21	46.01	6.44	34.63	42.01	47.42	48.74	59.65
29	Savana - Floresta Ombrófila	22	47.59	7.99	35.94	40.68	46.235	54.09	66.12
34	Rios e Lagos	7	48.31	7.73	39.86	44.08	45.1	51.38	62.27

Fonte: autora.

Figura 34 - Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de vegetação



(b)



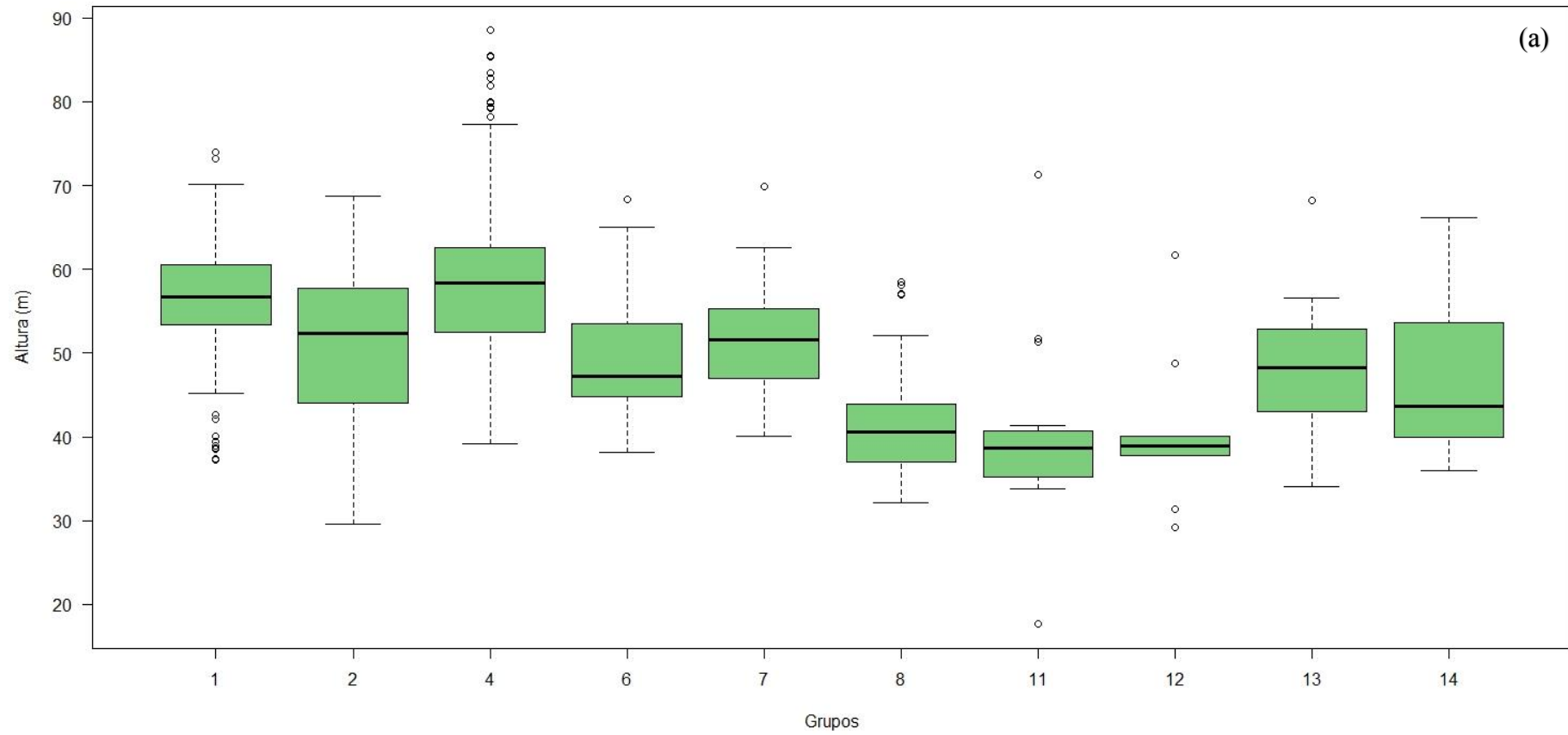
Fonte: autora.

Tabela 14 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2002)

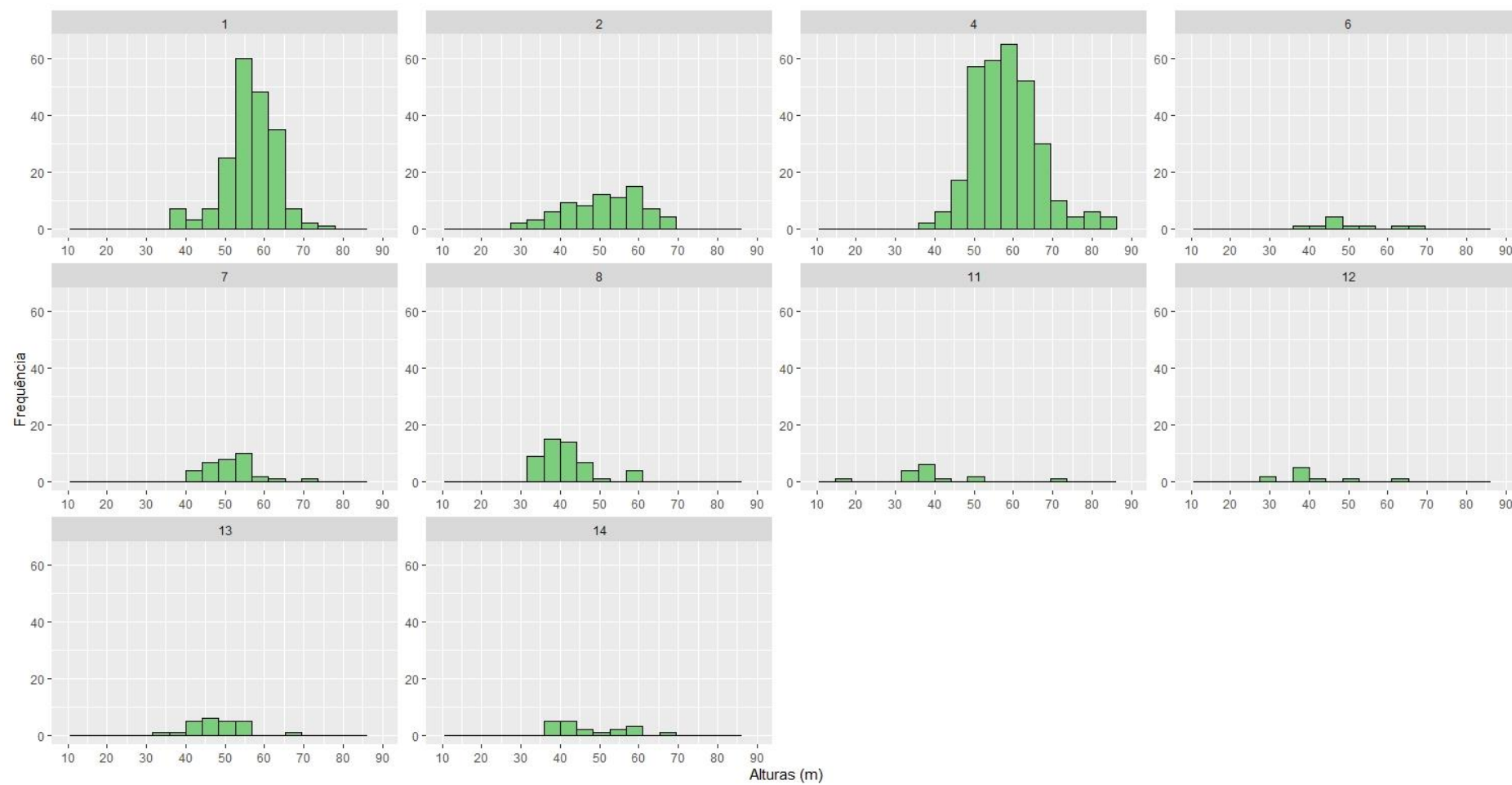
ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
1	Floresta Ombrófila Aberta - Floresta Tropical Caducifólia	195	56.38	6.42	37.28	53.40	56.67	60.53	73.93
2	Área Antropizada	77	51.03	9.61	29.57	44.08	52.30	57.74	68.73
4	Floresta Ombrófila Densa - Floresta Tropical Pluvial	313	58.45	8.33	39.17	52.51	58.38	62.63	88.5
6	Campinarana - Campinas do Rio Negro	10	50.49	9.48	38.12	45.11	47.24	52.70	68.36
7	Campinarana / Floresta Ombrófila - Área de Tensão Ecológica	33	51.52	6.15	40.08	47.04	51.55	55.27	69.85
8	Floresta Ombrófila / Floresta Estacional - Área de Tensão Ecológica	50	41.61	6.33	32.19	37.08	40.59	43.90	58.55
11	Vegetação com Influência Fluvial ou Lacustre	15	40.16	11.59	17.64	35.27	38.73	40.67	71.26
12	Savana - Cerrado	10	40.42	9.10	29.21	37.90	38.90	39.92	61.67
13	Savana / Floresta Estacional - Área de Tensão Ecológica	24	48.74	6.97	34.01	43.38	48.28	52.47	68.22
14	Savana / Floresta Ombrófila - Área de Tensão Ecológica	19	47.40	8.80	35.94	39.96	43.72	53.59	66.12

Fonte: autora.

Figura 35 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de vegetação



(b)



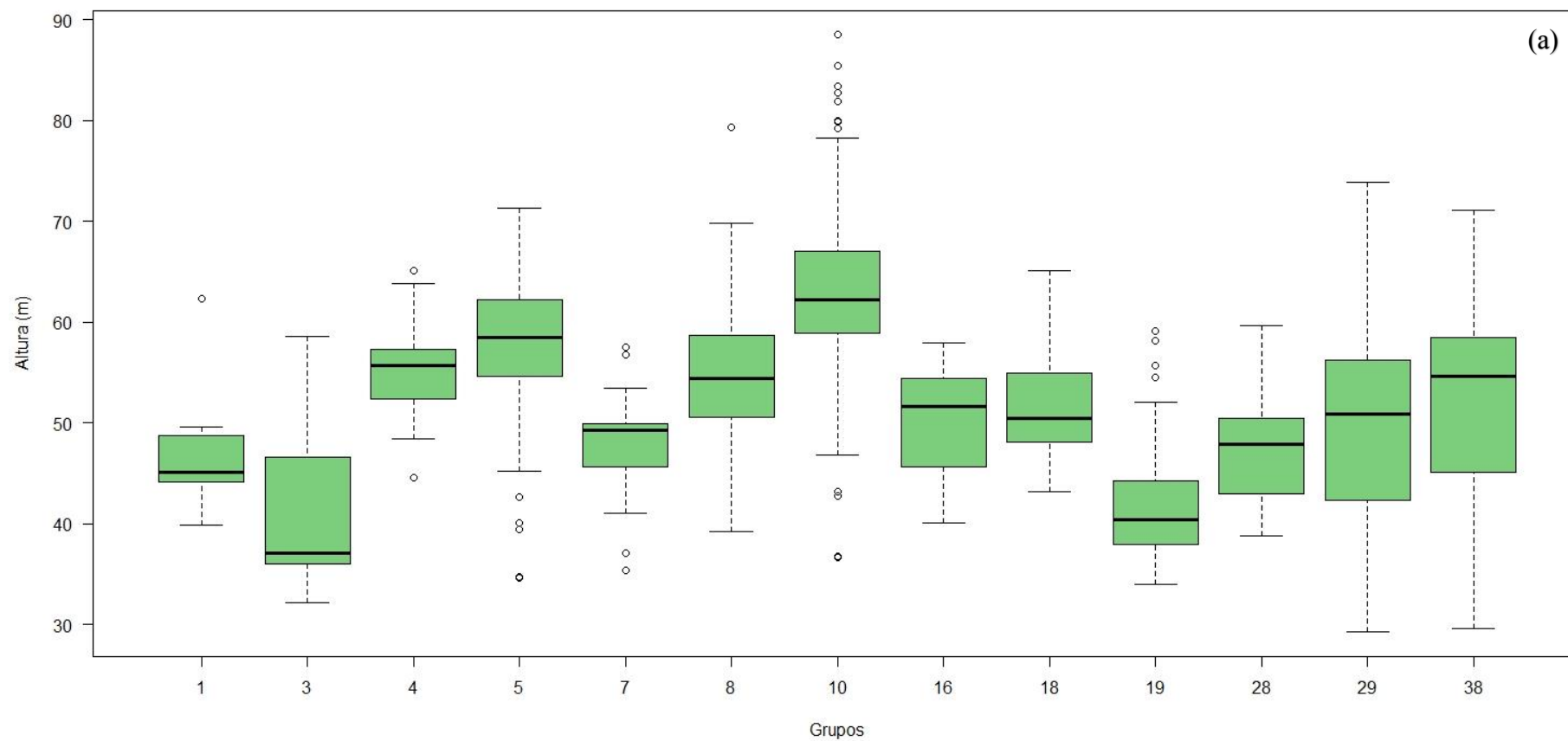
Fonte: autora.

Tabela 15 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2004)

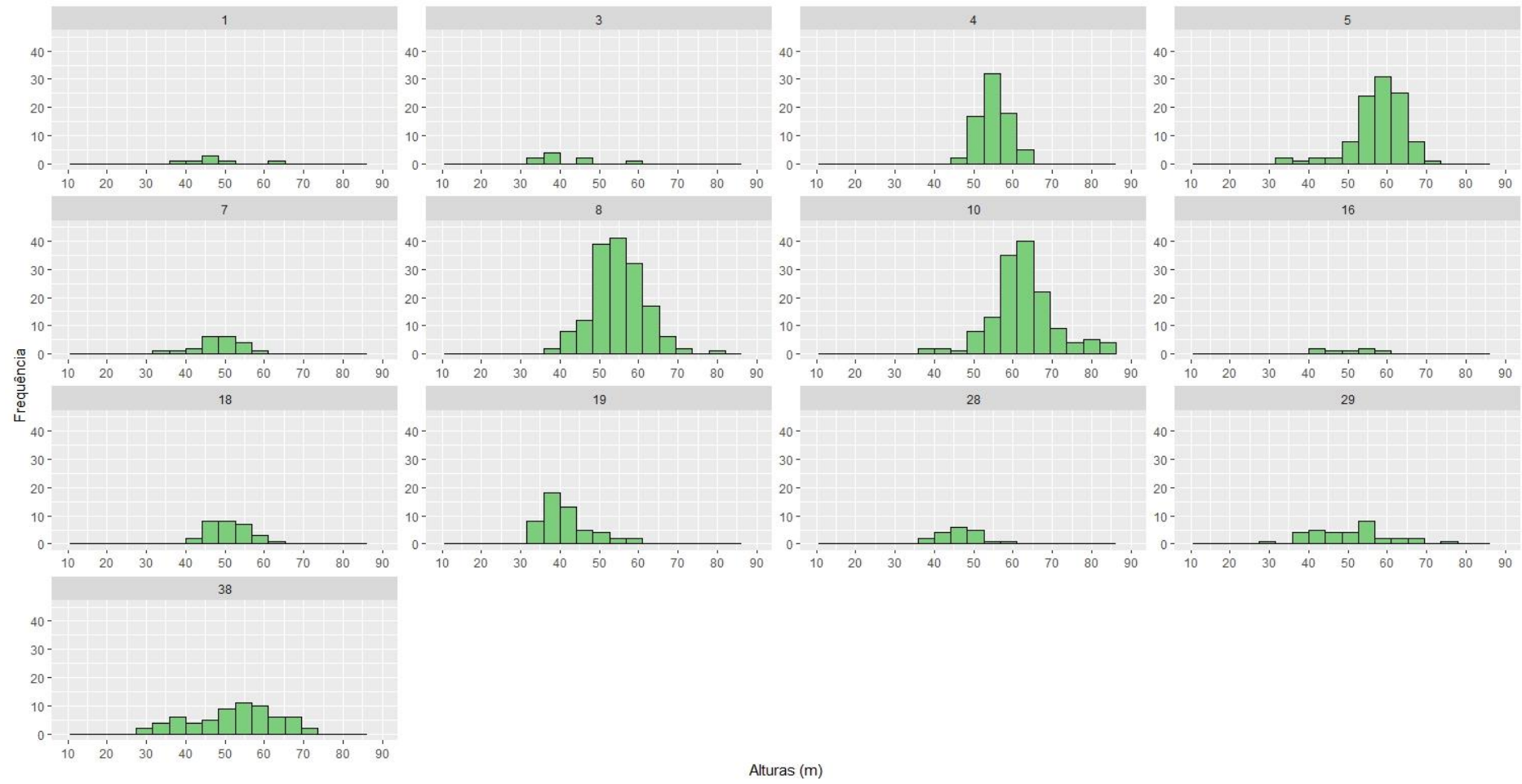
ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
1	Massa D'água	7	47.54	7.21	39.86	44.08	45.1	48.71	62.27
3	Atividades Agrárias	9	40.98	8.29	32.19	35.96	37.1	46.6	58.55
4	Vegetação Ombrófila Aberta Terras Baixas	74	55.17	3.70	44.56	52.495	55.6	57.31	65.12
5	Vegetação Ombrófila Aberta Submontana	104	57.90	6.55	34.63	54.63	58.5	62.185	71.26
7	Floresta Ombrófila Densa Aluvial	21	47.90	5.69	35.4	45.62	49.3	49.92	57.47
8	Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas	160	54.83	6.55	39.17	50.54	54.4	58.69	79.37
10	Floresta Ombrófila Densa Submontana	146	62.73	8.61	36.61	58.88	62.2	66.965	88.5
16	Campinarana Florestada	7	49.97	6.44	40.08	45.595	51.7	54.44	57.97
18	Campinarana/Floresta Ombrófila	29	51.29	5.28	43.14	48.06	50.5	54.97	65.06
19	Floresta Ombrófila/Floresta Estacional	52	41.96	6.26	34.01	38.205	40.4	44.11	59.1
28	Savana/ Floresta Estacional	19	47.54	5.48	38.73	42.97	47.9	50.45	59.65
29	Savana/Floresta Ombrófila	33	50.66	10.14	29.21	42.33	50.8	56.19	73.93
38	Vegetação Secundária e Atividades Agrárias	65	52.18	10.89	29.57	45.04	54.6	58.44	71.07

Fonte: autora.

Figura 36 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de vegetação



(b)



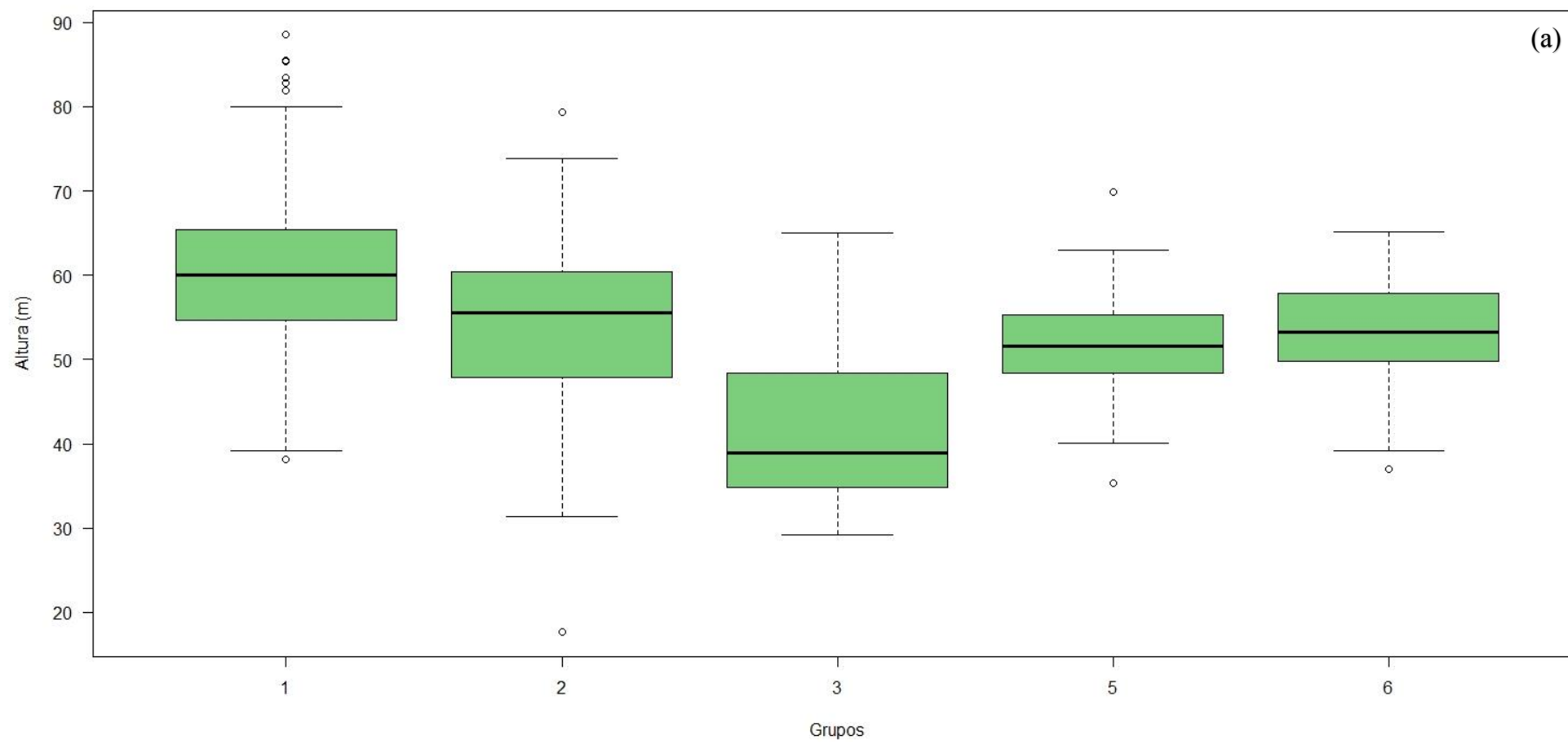
Fonte: autora.

Tabela 16 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Clima do Brasil (IBGE, 2002)

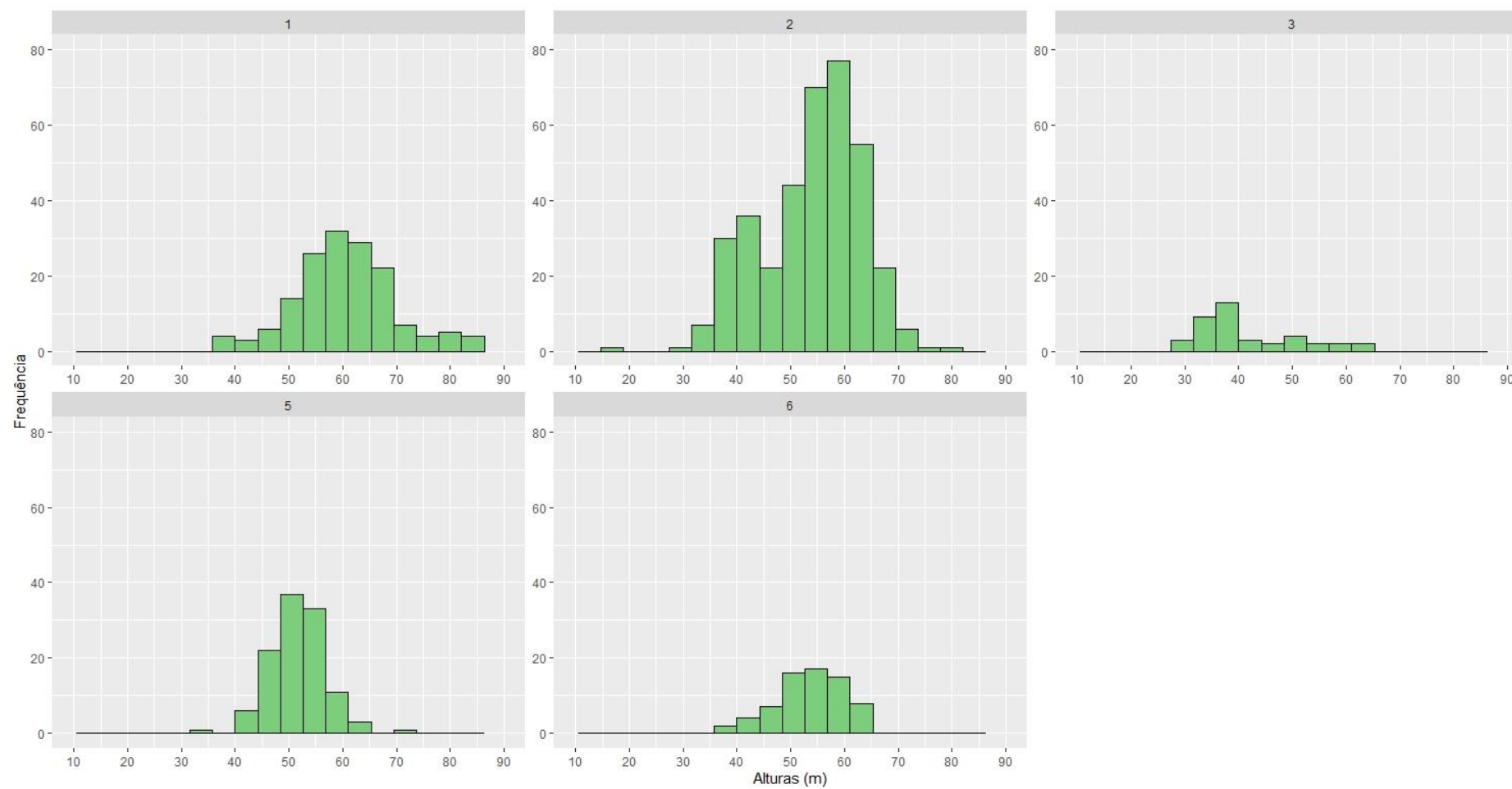
ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
1	1 a 2 meses secos	157	60.61	9.53	38.12	54.63	59.98	65.45	88.50
2	3 meses secos	373	53.92	9.28	17.64	47.91	55.52	60.47	79.37
3	4 a 5 meses secos	40	41.66	9.33	29.21	34.86	38.99	48.26	65.06
5	sem seca	114	51.72	5.19	35.4	48.43	51.60	55.24	69.85
6	subseca	69	53.58	6.15	37.04	49.82	53.25	57.88	65.12

Fonte: autora.

Figura 37 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de clima



(b)



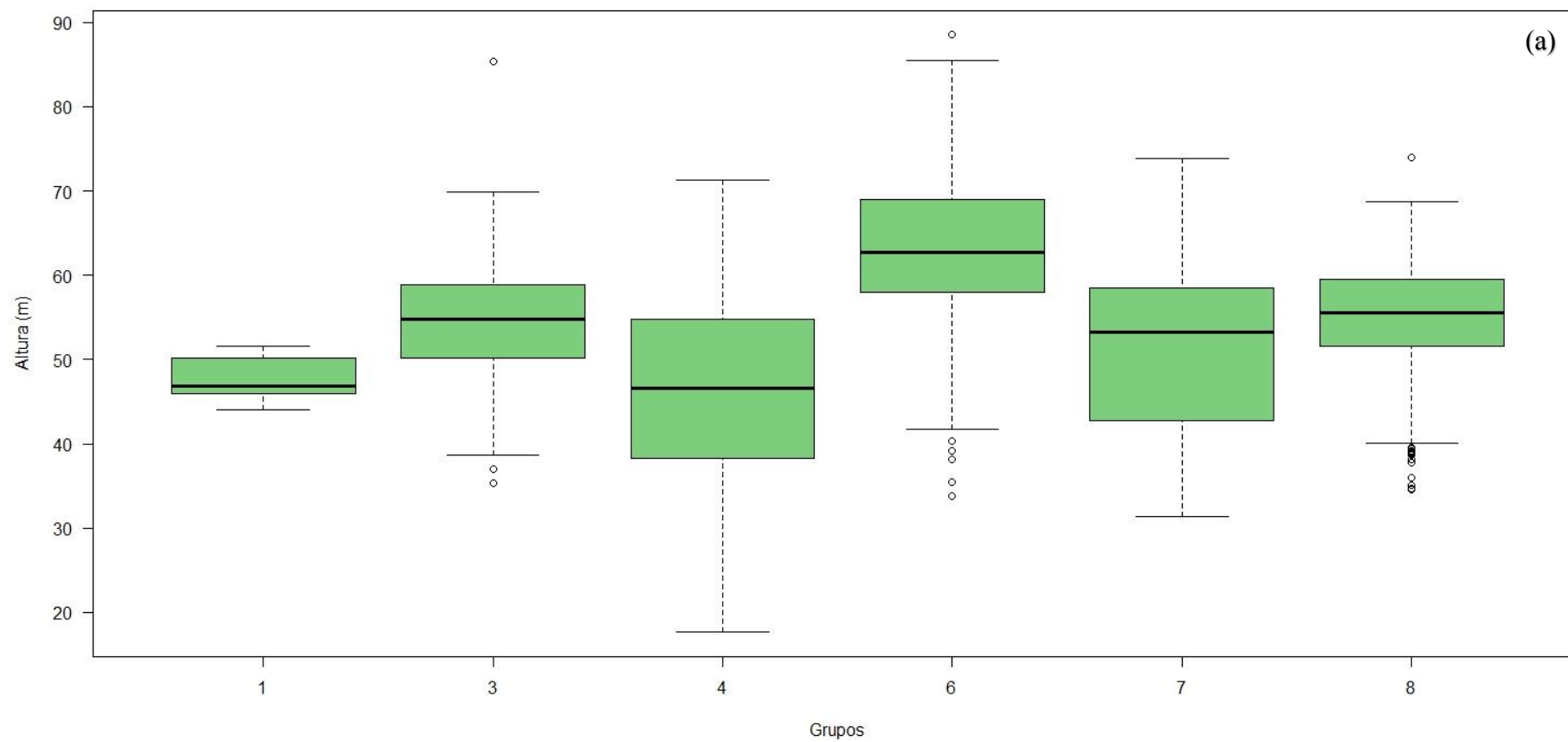
Fonte: autora.

Tabela 17 – Estatísticas descritivas das classes analisadas do Mapa de Potencial da Agressividade Climática na Amazônia Legal (IBGE, 2014)

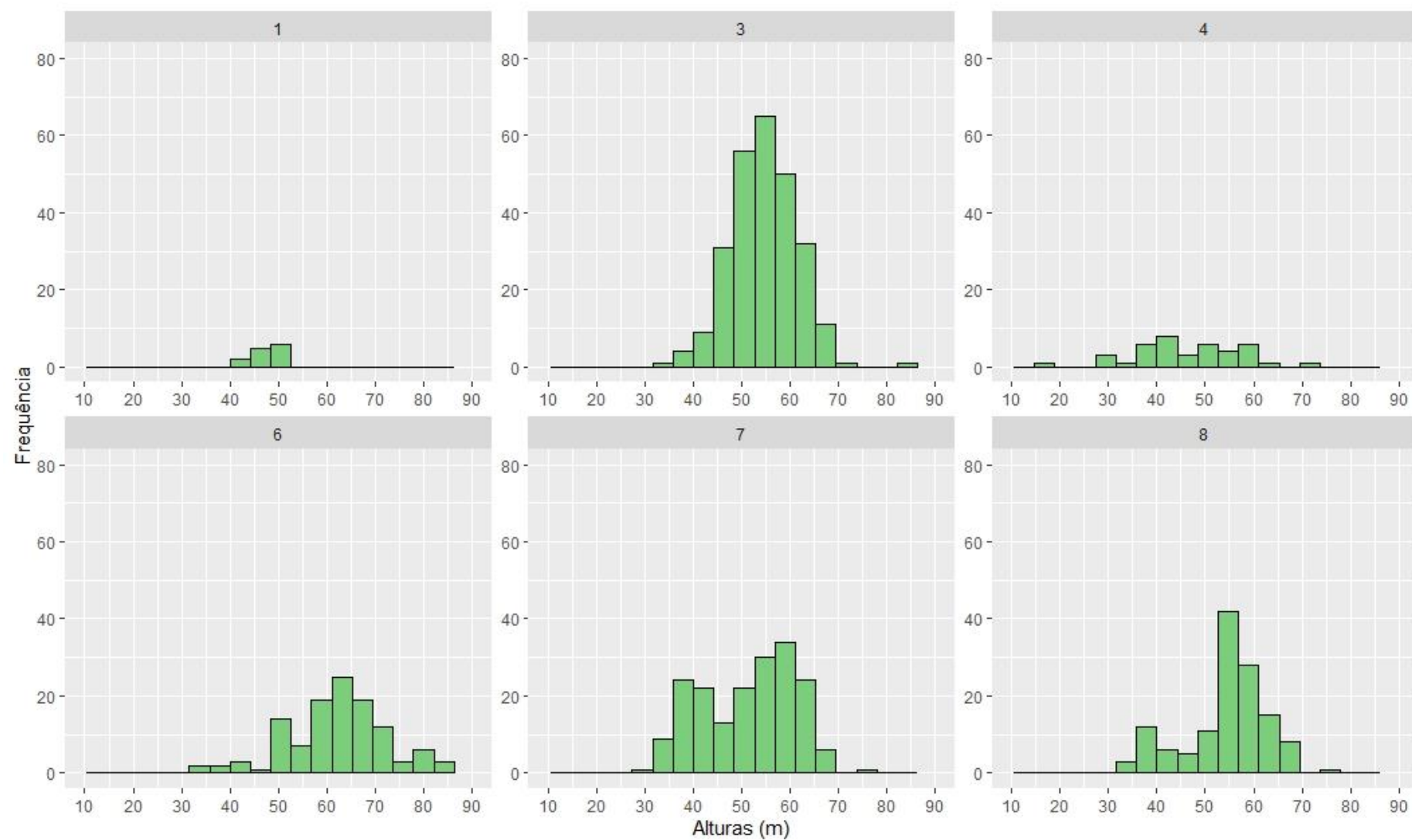
ID	Descrição	n	Média	DV	Min.	Q1	Mediana	Q3	Máx.
1	A1	13	47.70	2.73	44	46.02	46.8	50.12	51.55
3	M1	261	54.65	6.72	35.4	50.23	54.8	58.86	85.41
4	M2	40	46.01	10.95	17.64	39.1175	46.6	54.3625	71.26
6	B1	117	62.40	10.41	33.87	57.97	62.7	69.01	88.5
7	B2	186	51.26	9.58	31.39	42.7925	53.3	58.4775	73.8
8	B3	131	54.38	8.27	34.63	51.535	55.5	59.5	73.93

Fonte: autora.

Figura 38 – Gráfico de Boxplot (a) e Histograma (b) de distribuição das alturas por classe de clima



(b)



Fonte: autora.